

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

**Monitorování hustoty provozu  
v automobilové dopravě pomocí  
optovláknových Braggovských senzorů  
Traffic Density Monitoring Using Fiber  
Bragg Grating Sensors**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michael Fridrich**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Monitorování hustoty provozu v automobilové dopravě pomocí optovláknových Braggovských senzorů**  
**Traffic Density Monitoring Using Fiber Bragg Grating Sensors**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se orientuje na využití optovláknových Braggovských mřížek (FBG) v automobilové dopravě. Cílem práce je návrh a realizace rozvinovacího mobilního pásu využívajícího Braggovské mřížky pro monitorování hustoty provozu. Praktické řešení bude ověřeno experimentálním měření.

1. Rešerše konvenčních a optovláknových přístupů monitorování v automobilové dopravě.
2. Návrh a realizace mobilního senzorického pásu s FBG senzory.
3. Návrh a implementace algoritmů zpracování signálů z FBG senzorů v prostředí Matlab pro potřeby monitorování hustoty provozu.
4. Praktické ověření navrženého senzoru měřením v provozu.

## Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] OTHONOS, Andreas, Kyriacos KALLI a Francis T YU. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boston, Mass.: Artech House, 1999, xiv, 422 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 08-900-6344-3.
- [2] YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. Fiber optic sensors: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.

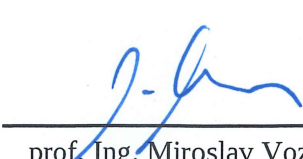
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marcel Fajkus, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



  
prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty



Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární  
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 26. dubna 2019

*Friedrich Michael* .....

Rád bych poděkoval Ing. Marcelovi Fajkusovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Rovněž patří můj dík mé rodině za její podporu po celou dobu studia a při vytváření této práce.

## **Abstrakt**

Optická vlákna s Braggovskými mřížkami slouží nejen pro telekomunikační účely, ale také pro účely senzorické a postupně nahrazují dříve používané technologie. Tato diplomová práce je zaměřena na monitorování hustoty automobilové dopravy. Cílem je výroba a otestování mobilního měřícího pásu s FBG senzorem v reálném provozu. Nejprve je zpracována teoretická část, ve které je provedena rešerše na danou problematiku a následně je popsán celý průběh výroby od výběru materiálů, přes experimentální pásy testované na teplotní, ohybové a deformační vlastnosti až po výrobu finálního pásu. Dále jsou v práci zpracovány dlouhodobá měření, na kterých byla ověřena funkčnost výsledného měřícího pásu. Práce obsahuje popis postupu zpracování dat a provedenou analýzu hustoty dopravy.

**Klíčová slova:** Optická vlákna; Braggovské mřížky; FBG senzor; Detekce; Hustota dopravy

## **Abstract**

Bragg gratings optical fibers serve not only for telecommunication purposes but also for sensory purposes and gradually replace previously used technologies. This diploma thesis is focused on monitoring car traffic density. The aim is to produce and test a mobile measuring belt with FBG sensor in the condition of real traffic. In the first, theoretical part, a research on the given issue is performed and the whole process of production from choosing the materials through experimental belts tested on temperature, bending, and deformation qualities, to production of the final belt is described. Further, long-term measurements are performed, on which the functionality of the final measuring belt was tested. The thesis contains the description of data processing method and performed analysis of the traffic density.

**Key Words:** Optical fiber; Bragg gratings; FBG sensor; Detection; Traffic density

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>12</b>
<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Optická vlákna</b>	<b>14</b>
1.1 Jednovidové vlákno (SMF)	14
1.2 Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu (MFF SI)	15
1.3 Vícevidové vlákno s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI)	16
<b>2 Braggovské mřížky FBG</b>	<b>17</b>
2.1 Historie Braggovských mřížek	18
2.2 Typy Braggovských mřížek	18
2.2.1 Uniformní Braggovská mřížka	19
2.2.2 Chirpovaná FBG	20
2.2.3 Apodizovaná FBG	20
2.2.4 FBG s fázovým posuvem	21
2.3 Využití FBG	21
2.3.1 V optických sítích	21
2.3.2 V aplikacích se senzory	21
2.3.3 Optické filtry	22
<b>3 Metody měření automobilové dopravy</b>	<b>24</b>
3.1 Piezoelektrické senzory	24
3.2 Měření pomocí indukčních smyček	25
3.3 Laserové měření rychlosti	26
3.4 Úsekové měření radary	26
3.5 Optické brány	27
3.6 Aplikace optických senzorů v automobilové dopravě	27
3.6.1 Testování optických senzorů na parkovišti Virginia Tech	27
3.6.2 Monitorování dopravy na parkovišti	28
3.6.3 Monitorování dopravy na mostu pomocí FBG	30
3.6.4 Monitorování stavu asfaltu a kalibrace FBG	32
3.6.5 Implementace a testování FBG senzorů na dálnici I-84	33
3.6.6 Monitorování dopravy na dálnici I-84	34

3.6.7	Speciální snímač optických vláken pro měření zatížení kol vozidel na dálnicích . . . . .	36
3.6.8	Monitorování dopravy pomocí sítě optických vláken . . . . .	38
3.6.9	Optické vlákno s FBG jako snímač pro měření rychlosti a rozvoru náprav	39
3.6.10	OptiWIM . . . . .	41
3.6.11	UnicamWIM . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Možnosti realizace mobilního pásu</b>	<b>44</b>
4.1	Zalevací materiály . . . . .	44
4.1.1	Stupnice Shore . . . . .	44
4.1.2	ZA 50 LT . . . . .	44
4.1.3	PU430-PH30 . . . . .	45
4.1.4	PU310-PH27 . . . . .	45
4.1.5	PU324-PH30 . . . . .	46
4.1.6	MC622-W360 . . . . .	46
4.1.7	Zalévání a testování materiálů . . . . .	47
4.2	Mobilní pásy bez ochrany optického vlákna . . . . .	48
4.2.1	Vytvrzování pásů . . . . .	48
4.2.2	Testování pásů na přejezdy automobilů . . . . .	49
4.3	Mobilní pásy s optickým vláknem v trubičce . . . . .	52
4.3.1	Výroba měřících pásů . . . . .	52
4.3.2	Teplotní vlastnosti měřené ve venkovním a vnitřním prostředí . . . . .	53
4.3.3	Odolnost pásů na přejezd automobilu . . . . .	56
4.3.4	Odolnost pásů na ohyb . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Monitorování hustoty dopravy s mobilním pásem FBG</b>	<b>63</b>
5.1	Realizace pásu a ověření funkčnosti v reálném provozu . . . . .	63
5.2	Metody zpracování naměřených dat . . . . .	64
5.2.1	Načtení dat . . . . .	64
5.2.2	Předzpracování - Preprocessing . . . . .	65
5.2.3	Detekce přejezdů . . . . .	66
5.2.4	Určení směru jízdy . . . . .	66
5.2.5	Analýza hustoty provozu . . . . .	66
5.3	Monitorování hustoty na veřejné komunikaci . . . . .	67
5.4	Monitorování hustoty na parkovišti . . . . .	69
	<b>Závěr</b>	<b>72</b>
	<b>Literatura</b>	<b>74</b>



## Seznam použitých zkratek a symbolů

FWHM	– Full width at half maximum
FBG	– Fiber Bragg grating
SMF	– Jednovidové vlákno
MFF SI	– Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu
SI	– Step Index
MFF GI	– Vícevidové vlákno s gradientním průběhem indexu lomu
WDM	– Wavelength Division Multiplex – vlnový multiplex
CWL	– Centrální vlnová délka
LGC	– Dlouhé vlákno s kompozitní ochranou
LGE	– Dlouhé vlákno vylepšené o provozní frekvenci
UCN	– Vlákno s nezpevněným kompozitem
lbs	– Libra - váhová jednotka
mph	– Míle za hodinu - jednotka rychlosti
3D GFRP-FBG	– Three-dimension Glass Fiber-Reinforced Polymer packaged Fiber Bragg Grating sensor
$\lambda_B$	– Braggovská vlnová délka
$n_{eff}$	– Efektivní index lomu
$\Lambda$	– Periodicita mřížky

## Seznam obrázků

1.1	Jednovidové vlákno [1] . . . . .	15
1.2	Vícevidové vlákno se SI profilem [1] . . . . .	16
1.3	Vícevidové vlákno s gradientním průběhem indexu lomu [1] . . . . .	16
2.1	Schéma fungování a principu FBG . . . . .	17
2.2	FBG v optickém vláknu . . . . .	18
2.3	Sinusový profil indexu lomu . . . . .	19
2.4	Spektrum Uniformní FBG . . . . .	19
2.5	Apodizovaná FBG; (a) spektrum s potlačením postranních laloků [5]; (b)(c) profil indexu lomu . . . . .	20
2.6	Profil indexu lomu FBG s fázovým posuvem . . . . .	21
2.7	Popis vlastností optického filtru . . . . .	22
3.1	Umístění piezoelektrického senzoru v asfaltu [9] . . . . .	25
3.2	Umístění a funkce indukční smyčky v reálném provozu [10] . . . . .	25
3.3	Laserový radar použitý v praxi . . . . .	26
3.4	Princip úsekových radarů . . . . .	27
3.5	Odezva při přejezdu vozidla [11] . . . . .	28
3.6	Odezva na přejezd; (a) přes senzor; (b) rozšířený výstup přejezdu přes dva vedle sebe ležící senzory [12] . . . . .	29
3.7	Odezva otáčejícího se automobilu [12] . . . . .	29
3.8	Testovací vozidlo a body testování [13] . . . . .	30
3.9	Přejezd nákladního automobilu [13] . . . . .	31
3.10	Detekce při běžném používání mostu [13] . . . . .	31
3.11	Výroba asfaltové testovací desky s FBG . . . . .	32
3.12	Tříbodový ohybový test . . . . .	32
3.13	Schéma zapojení FBG pro zapojení do provozu [15] . . . . .	33
3.14	Rozložení senzorů na vozovce; (a) nákres; (b) reálná implementace . . . . .	33
3.15	Přejezd automobilu s přívěsem a odezva přejezdu [15] . . . . .	34
3.16	Struktura FBG senzoru v kompozitní ochraně [16] . . . . .	34
3.17	Odezvy senzorů na člověka [16] . . . . .	35
3.18	Odezvy senzorů v provozu [16] . . . . .	35
3.19	Dvojitě jádrové vlákno; (a) průřez; (b) schéma profilu indexu lomu [21] . . . . .	36
3.20	Ohýbání vlákna třemi kolíky [21] . . . . .	37
3.21	Testování zařízení; (a) přejezd přes senzor; (b) výstup na osciloskopu [21] . . . . .	37
3.22	Struktura testovaného senzoru [20] . . . . .	38
3.23	Model 3 horizontálních výkyvů senzoru při tlaku pneumatiky 245 kPa [20] . . . . .	39
3.24	Geometrický design 3D GFRP-FBG; (a) fotka; (b) bokorys; (c) půdorys [17] . . . . .	40
3.25	(a) umístění senzorů; (b) výstup na osciloskopu po přejetí dvou náprav . . . . .	40

3.26	Testovací vozidlo . . . . .	41
3.27	Složení senzoru OptiWIM [18] . . . . .	42
3.28	Systém zabudovaný ve vozovce [18] . . . . .	42
3.29	Obousměrná konfigurace třířadového systému [19] . . . . .	43
3.30	Obousměrná konfigurace třířadového systému [19] . . . . .	43
4.1	Hroty pro měření tvrdosti Shore . . . . .	44
4.2	Zalití hmoty ve formách . . . . .	47
4.3	Pneumatika automobilu na vzorku . . . . .	47
4.4	Schéma sestrojení měřicího pásu . . . . .	48
4.5	Změna vlnové délky; (a) při zalití vlákna; (b) při vytvrzování . . . . .	49
4.6	Testování měřících pásů, směr jízdy zleva doprava . . . . .	49
4.7	Jednotlivé odezvy pásů; (a) ZA 50 LT; (b) PU430-PH30 . . . . .	50
4.8	Krabicový graf zaznamenaných přejezdů . . . . .	51
4.9	Krabicový graf zaznamenaných přejezdů . . . . .	52
4.10	Schéma sestrojení měřicího pásu . . . . .	52
4.11	Nezalitě vlákno a zalitě vlákno silikonem ZA 50 LT . . . . .	53
4.12	Teplota venkovního prostředí a průběhy změn vlnových délek . . . . .	54
4.13	Teplotní citlivost; (a) se stejnou počáteční teplotou; (b) chyby FBG teplotní citlivosti . . . . .	54
4.14	Umístění pásu a teplotního čidla ve venkovním prostředí . . . . .	55
4.15	Teplota v laboratoři a průběhy změn vlnových délek . . . . .	55
4.16	Teplotní citlivost; (a) se stejnou počáteční teplotou; (b) chyby FBG teplotní citlivosti . . . . .	56
4.17	Měřicí pás na podložce focen ze směru jízdy . . . . .	56
4.18	Velikost změny vlnové délky po přejetí středem pásů . . . . .	57
4.19	Normalizovaný graf přejezdů středem . . . . .	57
4.20	Velikost změny vlnové délky po přejetí nalevo . . . . .	58
4.21	Velikost změny vlnové délky po přejetí vpravo . . . . .	58
4.22	Krabicové grafy přejezdů přes pás ZA 50 LT . . . . .	59
4.23	Krabicové grafy přejezdů přes pás se sekundární ochranou . . . . .	60
4.24	Srovnání pásů při konvexním profilu ohybu . . . . .	61
4.25	Srovnání pásů při konkávním profilu ohybu . . . . .	62
5.1	Schéma vyrobeného pásu . . . . .	63
5.2	Položení pásu na vozovku ve směru nahoru . . . . .	63
5.3	Detekované přejezdy . . . . .	64
5.4	Postup zpracování dat . . . . .	64
5.5	Struktura výstupních dat z měřicího přístroje . . . . .	65
5.6	Průběh měření; (a) před aplikací filtru; (b) po procesu preprocessing . . . . .	65
5.7	Měřicí pracoviště vč. rozmístění měřících senzorů ve směru nahoru . . . . .	67

5.8	Detekovaný průjezd vozidla; (a) přes senzor v asfaltu; (b) přes mobilní pás . . . .	67
5.9	Hodinový graf průjezdů . . . . .	68
5.10	Měřicí pracoviště . . . . .	69
5.11	Detekované průjezdy vozidel; (a) popelářské vozidlo - 3 nápravy; (b) automobil - 2 nápravy; (c) automobil s vozíkem - 2 + 2 nápravy . . . . .	69
5.12	Frekvenční spektrum (a) přejezdu; (b) šumu; (c) s odečteným šumem . . . . .	70
5.13	Hodinová analýza detekovaných průjezdů pásem . . . . .	71

## Seznam tabulek

1.1	Základní parametry jednovidového vlákna . . . . .	15
1.2	Základní parametry vícevidového vlákna se SI profilem . . . . .	15
1.3	Základní parametry vícevidového vlákna se SI profilem . . . . .	16
4.1	Vlastnosti materiálu ZA 50 LT . . . . .	45
4.2	Vlastnosti materiálu PU430-PH30 . . . . .	45
4.3	Vlastnosti materiálu PU310-PH27 . . . . .	45
4.4	Vlastnosti materiálu PU324-PH30 . . . . .	46
4.5	Vlastnosti materiálu MC622-W360 . . . . .	46
4.6	Vlastnosti jednotlivých pásů . . . . .	48
4.7	Změny vlnových délek . . . . .	48
4.8	Přejezdy po pásu z ZA 50 LT . . . . .	50
4.9	Přejezdy po pásu z PU430-PH30 . . . . .	51
4.10	Vlastnosti použitých FBG vláken . . . . .	52
4.11	Naměřené hodnoty po přejezdech po pásu s uhlíkovou trubičkou . . . . .	59
4.12	Naměřené hodnoty po přejezdech po pásu se sekundární ochranou vlákna . . . . .	60
5.1	Vlastnosti použitého FBG vlákna . . . . .	63
5.2	Úspěšnost detekce měření . . . . .	68
5.3	Úspěšnost detekce měření . . . . .	70



## Úvod

V počátcích telekomunikačních a přenosových služeb se pro přenos informací využívala metalická vlákna. Později se začínala rozvíjet oblast optiky a optických komunikací. Rozšíření této oblasti mělo za následek vývoj nového přenosového média. Tímto médiem bylo optické vlákno, které bylo možné využívat od roku 1970.

Díky svým vlastnostem se optická vlákna začala používat pro přenos dat na větší vzdálenosti a s vyšší rychlostí. V průběhu let se ukázalo, že optické vlákno může sloužit i jako snímač. Od roku 1995 bylo publikováno velké množství odborných článků, vědeckých prací a odborné literatury, ve kterých byla optická vlákna použita jako senzor různých chemických a fyzikálních veličin.

Jedním z nejrozšířenějších typů senzorů jsou Braggovské mřížky (FBG). Braggovská mřížka je periodická struktura změny indexu lomu nacházející se v jádru vlákna. Za použití FBG a Fresnelova odrazu dochází k odrazení specifické vlnové délky zpět vláknem, přičemž ostatní délky jsou vláknem dále propouštěny. Nejzákladnější měřenou veličinou pomocí FBG je deformace a teplota. Na tyto dvě veličiny jsou FBG nejcitlivější. Dále mohou FBG sloužit pro měření vibrací, tlaku, ohybu, posunu, hmotnosti, rychlosti, elektrického proudu, atd. Tyto senzory jsou jednobodové, což znamená, že měření probíhá pouze v určitém bodě.

Tato diplomová práce se zaměřuje na měření v automobilové dopravě pomocí jednobodového FBG senzoru. V úvodu této práce jsou zpracovány teoretické informace o optických vláknech a Braggovských mřížkách (historie, typy a jejich využití v oboru senzoriky). V další části práce jsou popsány metody měření automobilové dopravy. V této sekci jsou nejprve popsány jednotlivé typy měřících senzorů využívaných v oboru dopravy a následně se zde nachází zpracovaná řešení již aplikovaných senzorů.

Praktická část této práce je věnována realizaci mobilního měřícího pásu s FBG senzorem. Tento pás je určený k monitorování automobilového provozu na komunikaci. Praktická část je rozdělena do dvou kapitol. V první je popsán výběr vhodných zalévacích materiálů k výrobě pásů a následně jejich otestování. Dále je zde popsán průběh výroby experimentálních pásů na kterých jsou prováděny pokusy a testy. Na těchto experimentálních pásech je testována deformační vlastnost ohybem, teplotní citlivost, změna vlnové délky v závislosti na vytvrzování materiálu a také deformace a vlastnosti pásů při přejezdu různých typů vozidel.

V druhé kapitole praktické části práce je popsána realizace mobilního měřícího pásu použitého pro monitorování hustoty dopravy v reálném provozu. Nachází se zde také popis postupu a metody zpracování signálu ve výpočetním prostředí MATLAB. Výstupem celé této části a celé diplomové práce je provedené dlouhodobé měření a analýza celkové hustoty provozu na zvolených komunikacích.

# 1 Optická vlákna

Přenosové médium sloužící k vhodnému vedení paprsku se nazývá optické vlákno. Paprsek světla, který nese informaci je tvořen fotony. Optické vlákno je složeno minimálně ze dvou částí – jádra a pláště. Dalšími vrstvami, které tvoří optické vlákno, jsou takzvané ochranné vrstvy (primární ochrana, sekundární ochrana). Na přenosové parametry má největší vliv materiál, ze kterého je vlákno vyrobeno. Jako materiál pro výrobu optického vlákna se nejčastěji používá sklo. Při výběru vhodné technologie dokáže přenášet teoreticky data neomezenou rychlostí.

Optická vlákna přinesla revoluci v oblasti moderních technologiích po roce 2000 a neustále pokračuje jejich vývoj vpřed. Primárním důvodem jsou stále se zvyšující nároky na přenos informací na velké vzdálenosti a na zvyšování přenosové kapacity pro přenos informací.

Hlavním důvodem používání optických vláken v telekomunikacích a senzorice je vysoká kvalita a kapacita signálu. Signál se přenáší v digitální podobě. Reprezentovaný je pouze dvěma stavy, logickou jedničkou (signál se šíří) nebo logickou nulou (signál se nešíří). V těchto dvou stavech se nachází zakódovaná a modulovaná informace. Výhoda oproti analogovým sítím je, že jednotlivé bity nejsou náchylné na kvalitu přenosu. Důležité je pouze rozeznat zda byl signál vyslaný nebo ne. K vyslání signálu do vlákna se v telekomunikacích používají nejčastěji laserové zdroje záření, které vysílají koherentní svazek světla do vláken.

V telekomunikaci i senzorice se nejčastěji používají optická vlákna s Braggovskou mřížkou, která tvoří takzvané optické filtry. Využití senzorických aplikací můžeme vidět například v automobilové dopravě, v železniční dopravě, v biomedicínských aplikacích nebo například i pro vedení informací na přenosové soustavě vysokého napětí, jelikož jsou optická vlákna imunní vůči elektromagnetickému rušení.

Podle toho, jaký průměr má jádro optického vlákna rozlišujeme vlákna jednovidová a vícevidová:

- **Jednovidové vlákno** – vlákno, kterým se šíří pouze jediný vid světla. Průměr jádra vlákna ( $5 - 10 \mu\text{m}$ ) odpovídá několika vlnovým délkám v řádu  $\mu\text{m}$
- **Vícevidové vlákno** – vlákno, které má dostatečně velký průměr jádra (větší než 10 mikrometrů) pro přenos více vidů světla. Vícevidová vlákna se dále dělí na vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MFF SI) a vlákna s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI).

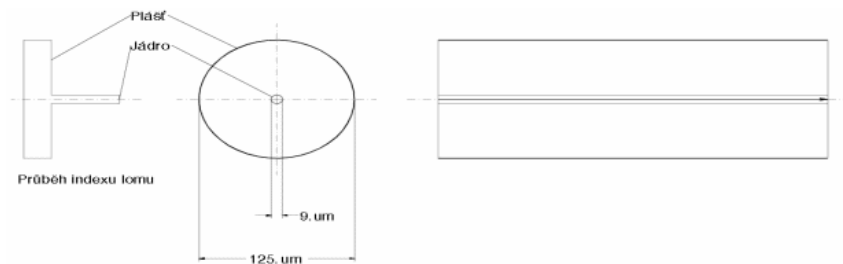
## 1.1 Jednovidové vlákno (SMF)

Jednovidové vlákno, se běžně vyrábí se step indexovým profilem lomu světla (viz. obrázek 1.1). Vlákno má malý poloměr jádra, což způsobuje, že v jádru není prostor pro existenci více vidů při přenosu. Vlákna se vyrábějí podle standardu ITU-T G.652 [2]. Využívají se pro přenos informací na střední až velké vzdálenosti a to z důvodu, že tyto vlákna se označují jako tzv. vlákna bez

disperze. Na vlnové délce 1310 nm mají totiž disperzi nulovou. Při vyšších vlnových délkách vlákno ovlivňuje chromatická a polarizační vidová disperze.

Tabulka 1.1: Základní parametry jednovidového vlákna

Průměr jádra	5 - 10 $\mu\text{m}$
Průměr pláště	$125 \pm 2 \mu\text{m}$
Numerická apertura	0,08 - 0,15
Měrný útlum při 1310 nm	0,35 dB/km
Měrný útlum při 1550 nm	0,2 dB/km



Obrázek 1.1: Jednovidové vlákno [1]

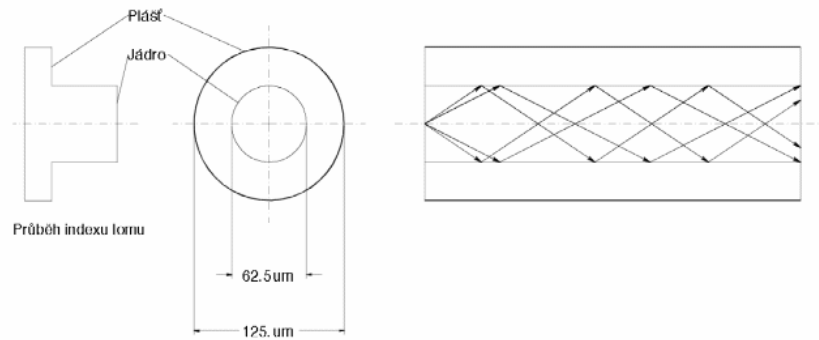
## 1.2 Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu (MMF SI)

Vícevidová vlákna se SI profilem mají strukturu znázorněnou na obrázku 1.2. Vlákna jsou vyráběna z vícekomponentních sloučenin skla, případně s dotací oxidu křemičitého. MMF SI vlákna mají velký průměr jádra a větší NA, což má za následek lepší navázání světla do vlákna. Jako zdroje záření se používají laserové (koherentní) i LED (nekoherentní) zdroje záření. Výhodou těchto vláken je nižší cena než je tomu u jednovidových vláken. Vlákna se vyrábějí podle standardu ITU-T G.651.1 [3] a paprsek se šíří na principu totálního odrazu ve vlákně. Vzniká zde vícecestné šíření signálu, což způsobuje vidovou disperzi, která omezuje šířku přenášeného pásma.

Tabulka 1.2: Základní parametry vícevidového vlákna se SI profilem

Typický průměr jádra	50 - 62,5 $\mu\text{m}$
Typický průměr pláště	125 $\mu\text{m}$
Numerická apertura	0,3 - 0,6
Měrný útlum při 850 nm	2,6 - 50 dB/km

Velký rozsah útlumu je způsobený různými metodami výroby vlákna. Skleněná vlákna mají útlum okolo 40 dB/km, zatímco vlákna dotovaná oxidem křemičitým mají útlum menší než 5 dB/km.



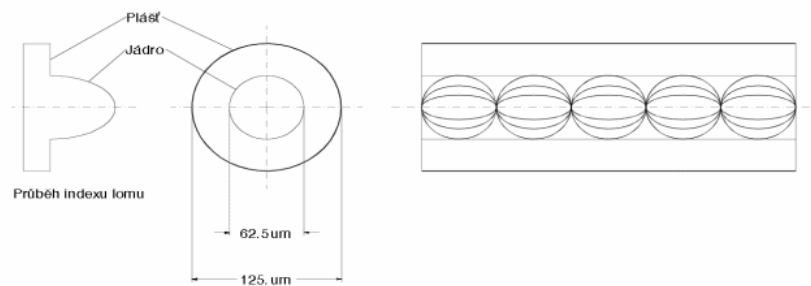
Obrázek 1.2: Vícevidové vlákno se SI profilem [1]

### 1.3 Vícevidové vlákno s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI)

Tento typ vlákna je vyráběný ze stejných materiálů jako vícevidová vlákna se SI profilem. Gradientní index lomu je speciální úprava jádra, která má plynulou změnu indexu lomu. Vlákno je tvořeno z tenkých vrstev, které mají různý index lomu (nižší ve větší vzdálenosti od jádra). Výhodou tohoto typu vlákna je eliminace vidové disperze, což má za následek menší zkreslení přenášeného signálu. Jako zdroj signálu se opět používají koherentní i nekoherentní zdroje záření.

Tabulka 1.3: Základní parametry vícevidového vlákna se SI profilem

Typický průměr jádra	50 - 62,5 $\mu\text{m}$
Typický průměr pláště	125 $\mu\text{m}$
Numerická apertura	0,18 - 0,24
Měrný útlum při 850 nm	2 - 10 dB/km
Měrný útlum při 1310 nm	0,4 dB/km
Měrný útlum při 1550 nm	0,25 dB/km



Obrázek 1.3: Vícevidové vlákno s gradientním průběhem indexu lomu [1]

## 2 Braggovské mřížky FBG

Braggovské mřížky jsou jednobodové senzory, které nám umožňují snímat měřené veličiny jen v daném bodě. Braggovská mřížka je speciální struktura, která se vytváří uvnitř jádra optického vlákna v řádech nm. V FBG dochází k pravidelné (periodické) změně indexu lomu a za použití Fresnelova odrazu dochází k odrazení specifické vlnové délky, přičemž ostatní délky jsou dále propuštěny. FBG slouží k přímému měření deformace nebo teploty.

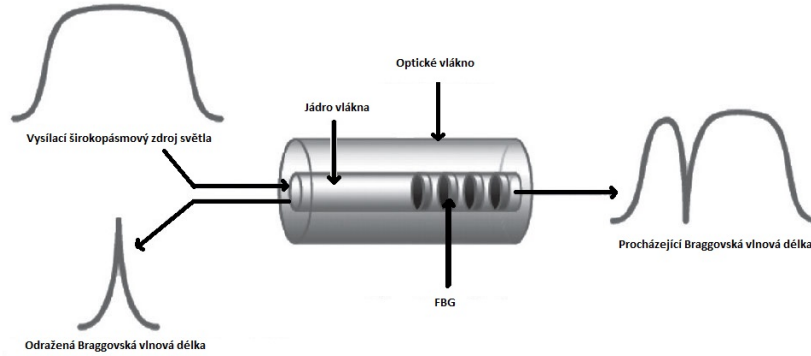
FBG pracují na principu navázání světla ze zdroje záření do optického vlákna, kde na Braggovské mřížce dojde k odrazu úzké části spektra zpět ke zdroji záření a zbylá část projde vláknem na druhý konec. Odražené spektrum světla se nazývá Braggovská vlnová délka, která se označuje  $\lambda_B$  (viz. Obrázek 2.1).

Změna Braggovské vlnové délky je úměrná osové deformaci vlákna případně změně teploty a je dána periodou změn indexu lomu jádra v optickém vlákně a efektivním indexem lomu označovaným jako  $n_{eff}$ .

Braggovská vlnová délka je dána vztahem:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (1)$$

kde  $\lambda_B$  je odražená vlnová délka,  $\Lambda$  je periodičita mřížky a  $n_{eff}$  je efektivní index lomu.



Obrázek 2.1: Schéma fungování a principu FBG

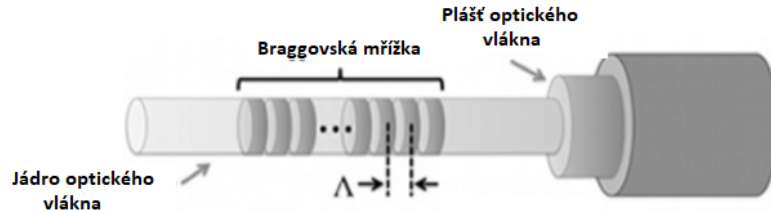
Abychom Braggovskou mřížku mohli ladit, musí být vyrobena takzvaná regulovatelná Braggovská mřížka. To lze provést například metodou napínání Braggovské mřížky (prodloužení optického vlákna). Metoda napínání se označuje jako mechanická. Dalším způsobem je nahřívání Braggovské mřížky (tepelné ladění). U této metody při změně teploty dochází k prodlužování Braggovské mřížky, čímž je dosažen malý rozsah pro nastavování. Změny napětí i teploty mají za následek změnu indexu lomu a změnu periody mřížky  $\Lambda$ . Tyto děje způsobí posunutí odražené vlnové délky  $\lambda_B$ . Nastavení vlnové délky můžeme popsat rovnicí:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e) \cdot \epsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T, \quad (2)$$



kde  $\lambda$  je posun vlnové délky,  $\lambda_0$  je počítaná vlnová délka,  $p_e$  je foto-elastický koeficient,  $\epsilon$  je změna deformace mřížky a  $(\alpha_\Lambda + \alpha_n)$  jsou koeficienty teplotní roztažitosti, které popisují změny indexu lomu.

Popis optického vlákna a Braggovské mřížky v jádře je vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: FBG v optickém vláknu

V dnešní době se vlákna s FBG používají v senzorce, kde udávají velmi přesné a spolehlivé údaje, které se dají využívat například v leteckém, automobilovém, lodním či stavebním průmyslu. FBG jsou odolné proti elektromagnetickému rušení a dají se tak používat v blízkosti elektrických vedení. Drobné snímače založené na FBG se nejčastěji vkládají do různých polymerů, které slouží jako ochrana Braggovské mřížky před vlivy deformace apod. a zároveň je to nejefektivnější řešení ochrany.

## 2.1 Historie Braggovských mřížek

První Braggovskou mřížku v optickém vlákne demonstroval v roce 1978 v Kanadě ve výzkumném centru fyzik Dr. Kenneth O. Hill a spol. Dokázali demonstrovat změny indexů lomu v germáni-okremíkovém optickém vlákne.

Posléze v roce 1989, který byl přelomový pro vývoj FBG, byla prezentována nová technologie výroby pomocí UV záření. Metoda výroby spočívala v jednodušším vytváření požadované změny indexu lomu.

Vývoj FBG se nezadržitelně šíří až do dnešní doby, kdy je na trhu několik desítek typů vláken s FBG, které jsou vyráběny různými metodami. Některé typy FBG jsou popsány v kapitole 2.2.

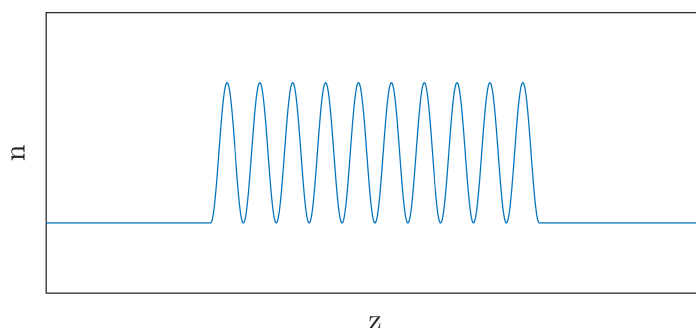
## 2.2 Typy Braggovských mřížek

Braggovských mřížek existuje několik typů. Mezi nejběžnější patří například Uniformní FBG, Apodizované FBG, Chirpované FBG a Tilted FBG. Nejzákladnějším typem FBG je Uniformní Braggovská mřížka, která má konstantní periodu změn indexu lomu.

### 2.2.1 Uniformní Braggovská mřížka

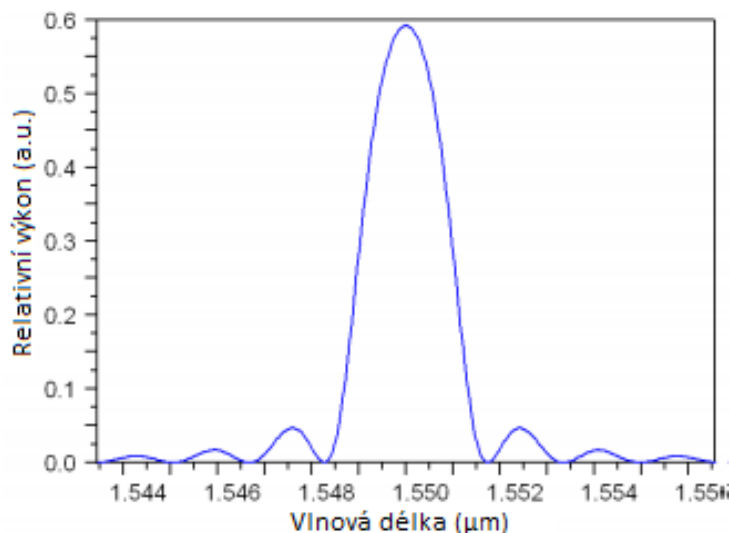
Uniformní Braggovská mřížka se označuje jako základní typ FBG. Její vlastností je konstantní perioda mřížky pro změnu indexu lomu v jádře optického vlákna. Je to nejpoužívanější a nejjednodušší vláknová mřížka. Odrazivost mřížky závisí na vlnové délce, která mřížkou prochází. Dále je závislá na rozdílech indexu lomu a na celkové délce mřížky. V závislosti na velikosti změny indukovaného indexu a na délce mřížky, může uniformní Braggovská mřížka pracovat jako širokopásmové zrcadlo, případně jako přenosový či odrazivý filtr. Je vynikajícím snímačem teplot a napětí, protože má v měření zakódovanou vlnovou délku. Tím se zbavuje problémů s intenzitním nebo amplitudovým kolísáním, které v jiných typech senzorických systémů existuje. Vlastní zakódovanou vlnovou délku může mít každá FBG.

Profil indexu lomu může být například sinusový, popřípadě obdélníkový.



Obrázek 2.3: Sinusový profil indexu lomu

Typickým charakteristickým znakem Uniformní Braggovské mřížky je úzké odrazné spektrum s výraznými postranními laloky (viz. Obrázek 2.4).



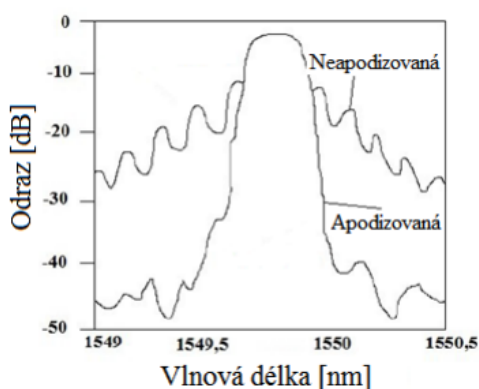
Obrázek 2.4: Spektrum Uniformní FBG

### 2.2.2 Chirpovaná FBG

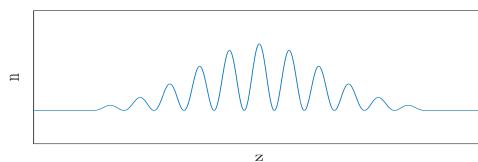
Základním rysem a znakem Chirpované Braggovské mřížky je monotónní proměna periody a samotné amplitudy. Změna indexu lomu může být lineární nebo kvadratická. Výsledkem rozmítání periody je poté rozšíření odrazného spektra FBG. Chirpovaná FBG se nejčastěji používá v telekomunikacích a v senzorických technologiích ke kompenzaci chromatické disperze.

### 2.2.3 Apodizovaná FBG

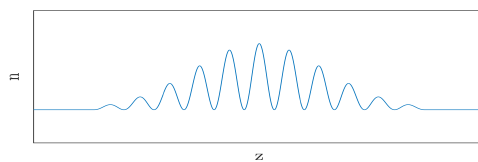
Apodizovaná Braggovská mřížka je výsledkem spektra uniformní Braggovské mřížky s hlavním vrcholem a s postranními laloky. Laloky jsou způsobeny odrazy protějšších konců mřížky a v některých aplikacích je potřeba je eliminovat, protože jsou nežádoucí. Z tohoto důvodu se používá apodizace (neboli postupně se zmenšující změny indexu lomu na okrajích mřížky) průběhu změn indexu lomu. V praxi to znamená, že se po délce mřížky bude měnit amplituda změn indexu lomu. Nejnížší hodnoty se nacházejí na okrajích a nejvyšší hodnoty ve středu mřížky (znázorněno na obrázcích 2.5(b) a 2.5(c)).



(a)



(b)

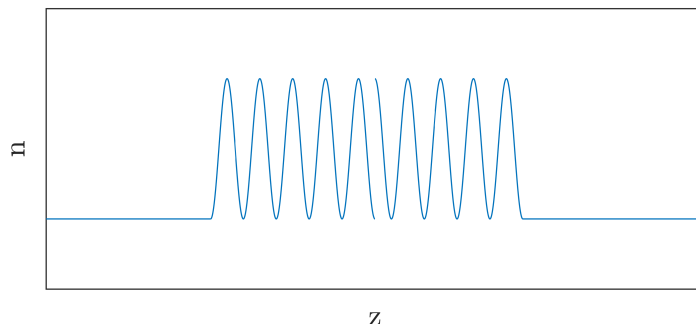


(c)

Obrázek 2.5: Apodizovaná FBG; (a) spektrum s potlačením postranních laloků [5]; (b)(c) profil indexu lomu

### 2.2.4 FBG s fázovým posuvem

FBG s fázovým posuvem jsou tvořeny změnou fáze průběhu indexu lomu. Používají se jako stabilizátor vlnové délky laseru. Struktura mřížky s fázovým posuvem je vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Profil indexu lomu FBG s fázovým posuvem

## 2.3 Využití FBG

### 2.3.1 V optických sítích

V optických sítích a komunikacích se Braggovské mřížky využívají zejména pro vyfiltrování určité vlnové délky světla při jeho průchodu vláknem. Jelikož se část světla procházejícím vláknem s Braggovskou mřížkou odrazí zpět a část se propustí, lze využít Braggovskou mřížku jako filtr (viz. kapitola 2.3.3).

Braggovské mřížky lze využít ve spojení s WDM. Toto spojení umožňuje řetězit za sebe více senzorů s nastavením různých vlnových délek na různých kanálech a tím docílit možnosti přenosu více informací po jednom vlákně. To má za následek zvýšení kapacity bez používání několika optických vláken. Jedno vlákno zajišťuje obousměrnou komunikaci.

V telekomunikační technice mají optická vlákna vícero využití. Nejčastější typ použití jsou optické multiplexory a demultiplexory.

### 2.3.2 V aplikacích se senzory

V oblasti senzorických aplikací je největší přínos v takzvaných vláknově optických snímačích. V tomto případě je kladena celá řada technických a funkčních požadavků: přenosová (odrazová) filtrace, vysoká citlivost, vlnově zakódovaná odezva, velký dynamický rozsah atd.

Jednotlivé vlastnosti lze měnit působením vnějších vlivů. Pro mřížky v senzorice je základním aspektem citlivost na okolní deformace a teploty, které se vyjadřují vztahem odvozeným z rovnice 2:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = k\epsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T, \quad (3)$$

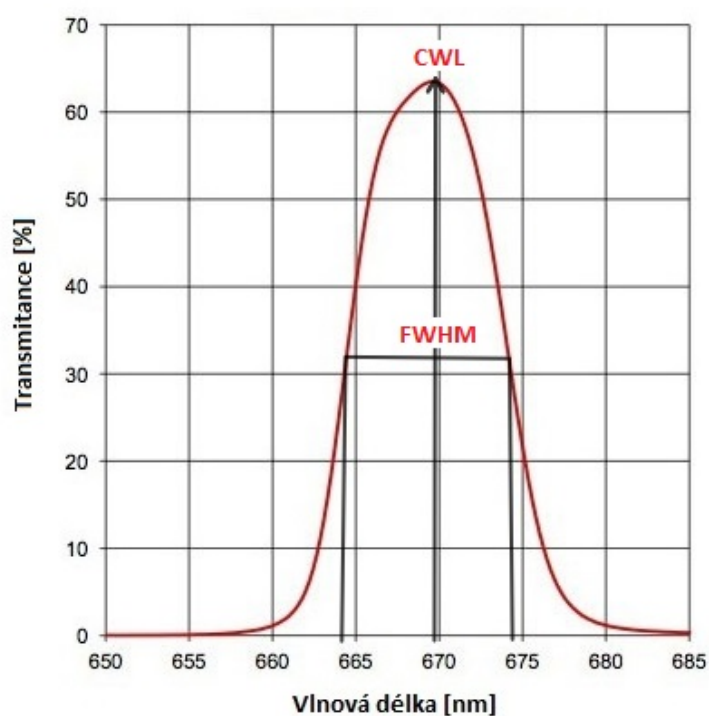
kde  $\epsilon$  je deformace a  $k$  je koeficient deformace,  $\alpha_A$  značí koeficient teplotní roztažnosti a  $\alpha_n$  je teplotně optický koeficient.

Senzorické aplikace se dělí na dvě širší skupiny: senzory pro monitorující činnost a sledovací aplikace.

Monitorovací senzory se využívají na prostorově velkých stavbách (mosty, trupy lodí, železnice, silnice,...) a slouží pro sledování fyzikálních veličin. Nejčastější využití těchto senzorů je při monitoringu vibrací, tlaků a ohybů. Sledovací aplikace jsou využívány pro měření velmi slabých signálů a vyžadují vysoké rozlišení a citlivost. Tyto aplikace jsou využívány například v podvodním pozorování u tzv. hydrofonu.

### 2.3.3 Optické filtry

Pod pojmem optický filtr lze rozumět zařízení, které zadržuje, případně propouští určité spektrální oblasti a vlnové délky. Standardní parametry filtrů jsou šířka pásma, maximální přenos a nebo FWHM vyobrazené na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Popis vlastností optického filtru

FWHM znamená v překladu spektrální šířka v poloviční amplitudě. Je to rozsah daný rozdílem mezi dvěma extrémními hodnotami nezávislé proměnné, při které je závislá proměnná rovna polovině jeho maximální hodnoty. U optických filtrů používaných na větší vzdálenosti je



zapotřebí ovlivňovat i disperze, které při přenosu vznikají. Funkce optických filtrů se vyjadřuje pomocí rovnice:

$$A(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(0, \omega) \cdot \exp\left(\frac{i}{2}\beta z \omega^2 - i\omega t\right) d\omega, \quad (4)$$

kde  $F(0, \omega)$  je Fourierova transformace z  $A(0, \omega)$ . Degradace signálu je způsobena faktorem  $\left(\frac{i}{2}\beta z \omega^2 - i\omega t\right)$ . Tento faktor se získává ze složek impulzů během šíření signálu optickým vláknem. Všechny metody se tento faktor pokouší potlačit a tím snížit celkovou disperzi.

Na základě způsobu filtrování jsou optické filtry rozděleny na dvě základní kategorie:

- **Absorpční filtry** – blokují světlo na základě absorpčních vlastností. Světlo je zadrženo ve filtru a neodráží se mimo něj.
- **Dischroické filtry** – odrážejí nežádoucí vlnové délky z požadované části spektra. Žádoucí spektrum z důvodu možnosti rozdělení dvou vlnových délek do dvou zdrojů.

### 3 Metody měření automobilové dopravy

Senzory s optickými vlákny ve srovnání s obvyklými elektrickými senzory disponují následujícími výhodami:

- velká informační kapacita / kapacita nosnosti informací
- malé rozměry
- odolnost vůči elektromagnetickému rušení (EMI) a rušení rádiovými signály (RFI)
- malá hmotnost
- geometrická flexibilita
- možnosti flexibilních konfigurací

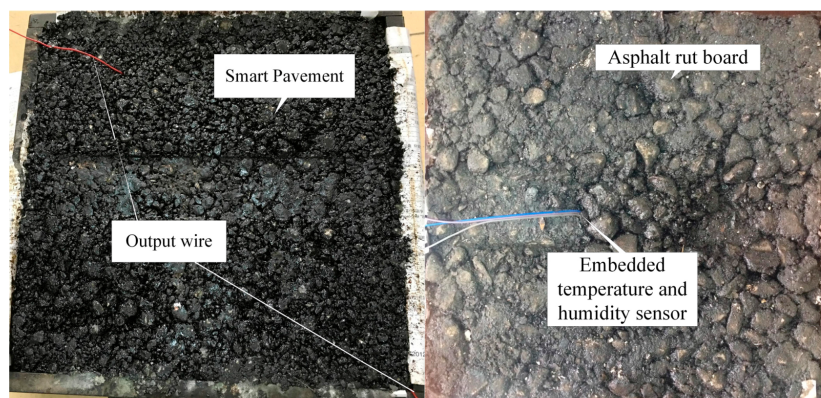
Na základě těchto vlastností jsou senzory s optickými vlákny obzvláště atraktivní pokud jde o sledování a zaznamenávání různých fyzických parametrů pro bezpečnostní systémy v dopravě. Tyto senzory mohou být vyvinuty na sledování počtu dopravních prostředků, monitorování povětrnostních podmínek a podmínek, které ovlivňují viditelnost.

V této kapitole se nachází literární a patentové řešerše, popisující tematiku monitorování automobilové dopravy.

#### 3.1 Piezoelektrické senzory

Piezoelektrické senzory jsou citlivé na stlačování měřicí sondy. Stlačování je způsobeno kolem, případně nápravou vozidla, které přes sondu projíždí. Vzniklé napětí se rovná síle, případně váze působící na senzor. Měřicí sondy jsou ukládány do podélných drážek vyfrézovaných ve vozovce a následně jsou zalité epoxidem. Ke správné instalaci piezoelektrických senzorů je zapotřebí měřicí sonda, měřicí elektronika, řídicí jednotka, propojovací kabel mezi sondou a jednotkou a napájení celého systému.

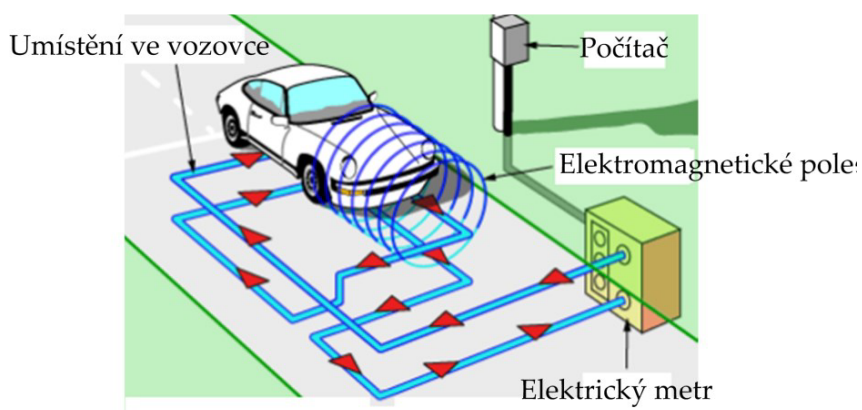
Nevýhodou těchto senzorů při měření v automobilové dopravě, je citlivost na okolní teplotu (při nižších teplotách účinnost senzoru klesá). Další nevýhodou je minimální měřitelná rychlost, která se pohybuje okolo 20 km/h.



Obrázek 3.1: Umístění piezoelektrického senzoru v asfaltu [9]

### 3.2 Měření pomocí indukčních smyček

Indukční smyčky jsou v dnešní době jedním z nejpoužívanějších typů senzorů. Implementace je zobrazena na obrázku 3.2. Princip měření spočívá ve změně indukce v elektromagnetickém poli. Smyčky se implementují do vozovky a slouží jako elektromagnetické detektory, které mají určité stacionární pole. Celý měřicí detektor se skládá z indukční smyčky, detektoru a jednotky sloužící k analýze dat. Smyčka je umístěna v kabelovém vodiči pod povrchem asi 20 - 70 mm a vyzařuje okolo sebe magnetické pole, které se v přítomnosti vozidla (kovových předmětů) naruší a změněné hodnoty jsou zaznamenány detektorem k následné analýze. Tento systém je vhodný ke klasifikaci (hustotě) provozu, k měření rychlosti nebo například ke sběru dat o dopravě a k následným průzkumům. Výhodou je snadná instalace, spolehlivost a přesnost měření. Oproti piezoelektrickým senzorům zde není taková citlivost na zarovnání senzoru s povrchem. Nevýhodou těchto senzorů je jejich nepoužitelnost v místech, kde se nachází rušivé elementy elektromagnetického pole, jako jsou například železobetonové konstrukce. Další nevýhodou je náchylnost smyčky na přetržení, kterou způsobují těžká vozidla a následné vyšší náklady na opravy.



Obrázek 3.2: Umístění a funkce indukční smyčky v reálném provozu [10]

### 3.3 Laserové měření rychlosti

Tento typ měření je velice oblíbený a používáný v praxi a to díky rychlosti měření, která se pohybuje okolo 0.5 s. Během tohoto času totiž nemá měřený objekt šanci zpomalit na předepsanou rychlost. Měřit lze při dobrých přírodních podmínkách vozidla až do vzdálenosti 1,8 km. Princip měření je velice jednoduchý. Nejprve se měřené vozidlo zaměří pomocí hledáčku a následně se směrem k němu vyšlou infračervené impulzy, které jsou odraženy zpět ke zdroji záření. Infračervené impulzy jsou vyslány na vlnové délky 904 nm. Zařízení na základě času mezi vyslaným a přijatým impulzem vypočítá rychlost jízdy. Impulzy jsou vysílány až 3200x za sekundu. Laserové měření rychlosti využívá nejvíce v praxi Policie ČR, která měří rychlost vozidel na komunikacích (viz. obrázek 3.3).



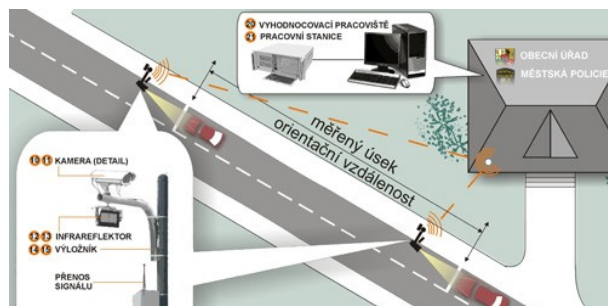
Obrázek 3.3: Laserový radar použitý v praxi

### 3.4 Úsekové měření radary

Toto měření je prováděno v předem stanoveném úseku. K měření jsou zapotřebí dvě kamery, dva infrareflekory, zařízení pro přenos signálu a vyhodnocovací stanice. Při vjezdu do měřeného úseku první kamera zachytí vozidlo, pořídí fotografii, ze které následně rozpozná SPZ. Na konci měřeného úseku se nachází další kamera, která vozidlo zaznamená znovu a na základě těchto dvou fotografií a zaznamenaných časů průjezdů je vypočítaná rychlost dle vztahu

$$v = \frac{s}{\Delta t}, \quad (5)$$

kde  $v$  je vypočítaná průměrná rychlost,  $s$  je vzdálenost měřeného úseku a  $\Delta t$  je časový rozdíl mezi pořízenými fotografiemi.



Obrázek 3.4: Princip úsekových radarů

Z dat pořízených úsekovými radary lze určit i hustotu provozu na komunikaci, jelikož radary zaznamenávají všechny projetá vozidla.

### 3.5 Optické brány

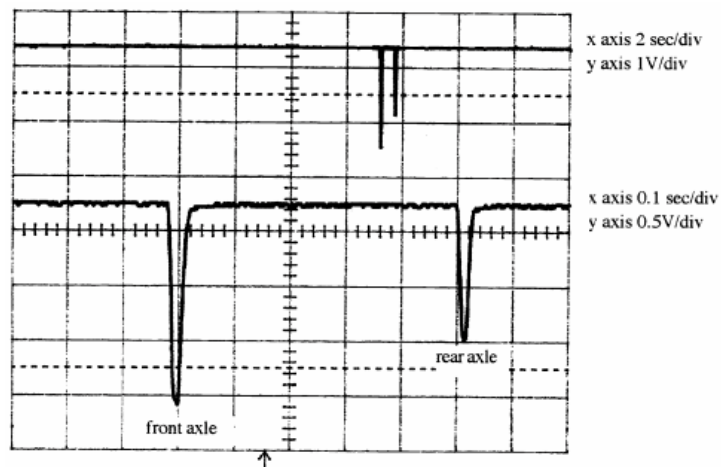
Optické brány sloužící k monitorování dopravy se skládají ze dvou částí. Vysílací část obsahuje laserovou diodu, která vysílá paprsek na vlnové délce 635 nm. Na protější straně se nachází detektor, který je složen z propustného skla, sloužícího jako filtr typu horní propust, který propouští vlnové délky vyšší než 600 nm. Jedná se o filtr jehož propustnost je 50%. Princip měření spočívá ve vyhodnocování dvou stavů na detektoru (Log 0 a Log 1). Stav Log 0 signalizuje, že detektor přijímá paprsek ze zdroje, tudíž neprojíždí žádný automobil. Log 1 značí přerušení paprsku a detekci automobilu.

### 3.6 Aplikace optických senzorů v automobilové dopravě

#### 3.6.1 Testování optických senzorů na parkovišti Virginia Tech

Optický senzor, který byl v tomto experimentu využit a testován, se skládal pouze z jednoho optického vlákna se senzorickou částí. Celý experiment se odehrával na parkovišti společnosti Virginia Tech. Důležitou a nejtěžší částí při vývoji senzoru bylo omezení citlivosti na okolní jevy (teplota, déšť nebo sníh). Dále nesměl senzor překážet motoristům při jízdě a musel být odolný vůči vandalům, kteří by senzor mohli poničit. V neposlední řadě musel senzor odolat těžkým vozidlům a vozidlům upravující komunikace.

Proto bylo vlákno implementováno do předem připravené drážky, která byla 1,27 cm hluboká a 2,54 cm široká. Po vložení vlákna byla drážka zasypána epoxidovou pryskyřicí a podrobena testování. To bylo z důvodů velikosti parkoviště omezeno. Vozidla se nemohla dostatečně rozjet a proto bylo testování prováděno jen při nízkých rychlostech. Testovací rychlost vozidla při přejezdech byla nižší než 20 mph (32,19 km/h) a váha jednotlivých náprav vozu byla rozdílná. Přední náprava vážila 1729 lbs (784,26 kg) a zadní 1480 lbs (671,32 kg). Snímání probíhalo za použití standardního detektoru, předzesilovače a byl nastaven poměr signálu od šumu na hodnotu 50 dB.



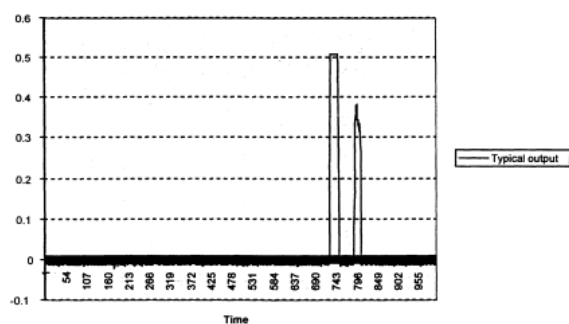
Obrázek 3.5: Odezva při přejezdu vozidla [11]

Na základě zaznamenaných odezev se určila každá nápravu zvlášť a dala se tak určit i rychlost přejezdu. V tomto konkrétním případě vyobrazeném na obrázku 3.5 byla rychlost vypočtena na 16 mph (25,75 km/h). Z tohoto experimentu vyplývá, že k monitorování dopravy v provozu lze použít správně ochráněné optické vlákno se senzorem. Tohoto poznatku dále využívám k sestavení mého měřicího pásu sloužícího k monitorování hustoty dopravy.

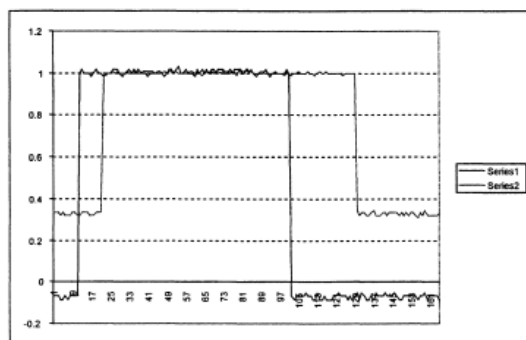
### 3.6.2 Monitorování dopravy na parkovišti

V tomto experimentu byly vyrobeny optické senzory, které byly nainstalovány na parkovišti - ve vozovce byly vysekány drážky pro senzory náprav vozidel. Senzory byly vsazeny do drážek, které byly následně vyplněny těsnícím materiálem. Testováno bylo mnoho materiálů, včetně těsnícího materiálu využívaného na zalévání magnetických a indukčních senzorů do asfaltu. Tento materiál se používá k nenápadnému vsazení senzorů do povrchu vozovky a obvykle se využívá na rychlé zalití smyčkových detektorů. Pro jeho vlastnosti byl materiál použit i při tomto experimentu.

S projíždějícími vozidly na místech, kde byly zavedeny senzory, se na výstupu objevily interferometrové třásně tam, kde byl tlak vyvinutý na těsnícím materiálu se senzorem [12].



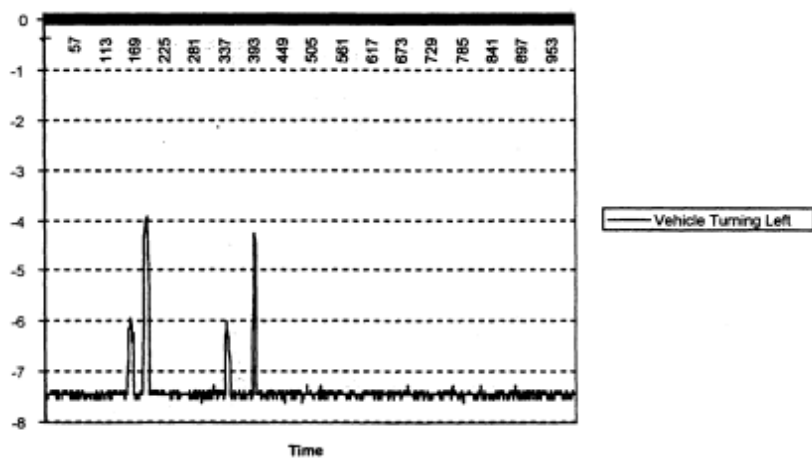
(a)



(b)

Obrázek 3.6: Odezva na přejezd; (a) přes senzor; (b) rozšířený výstup přejezdu přes dva vedle sebe ležící senzory [12]

Dále se zde zjišťovalo, zda se pomocí těchto senzorů dá zjistit i to, pokud se vozidlo otáčí. Typický výstup znázorněný na obrázku 3.6 ukazuje dva impulsy, kdy přes senzor prošla přední a zadní náprava vozidla. Pro otáčející se vozidla platí, že impuls vyvolá každá pneumatika, což vyústí v 4 impulsy na grafu. Výstup pro otáčející se vozidla byl zaznamenán a je vyobrazený na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Odezva otáčejícího se automobilu [12]

### 3.6.3 Monitorování dopravy na mostu pomocí FBG

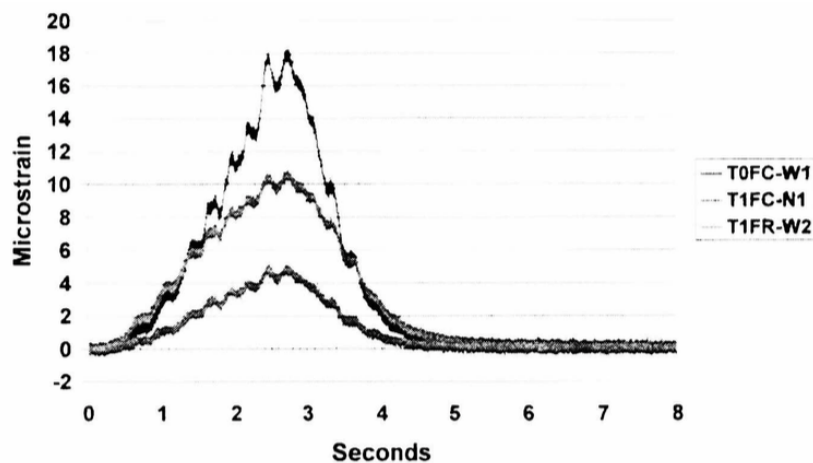
Tento experiment se odehrával v roce 1999 na mostě Horsetail Falls v Oregonu. Na most, který byl určen nejprve pro koňské povozy a následně pro lehčí automobily, bylo připevněno 28 vláknových senzorů z nichž po dokončení fungovalo 26. Testování probíhalo nákladním vozidlem s posádkou.



Obrázek 3.8: Testovací vozidlo a body testování [13]

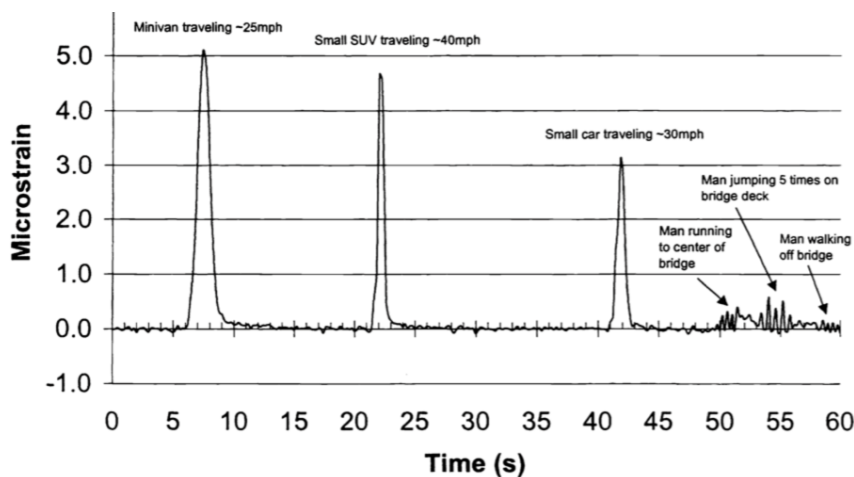
Pět vysokorychlostních demodulátorů s vláknovými mřížkami s šířkou pásma 10 kHz bylo umístěno pod mostem. Tyto demodulátory byly použity na podporu dynamických zkoušek, které se skládali z přesunu zkušebního vozidla přes most při různých rychlostech a z pohledu na deformace mostu na více místech současně. Obrázek 3.8 znázorňuje jednotky s vysokou rychlostí, které byly umístěny na výbězcích pod mostem Horsetail Falls. Jednotlivé celky byly založeny na laditelných filtrech vláknových mřížek, které by mohly být použity k modulaci zpětného spektrálního signálu.





Obrázek 3.9: Přejezd nákladního automobilu [13]

Graf na obrázku 3.9 znázorňuje přejezd nákladního automobilu při rychlosti 24 km/hod, při nastavené rychlosti sběru dat 2 kHz přes 3 senzory.



Obrázek 3.10: Detekce při běžném používání mostu [13]

V tomto experimentu bylo cílem zjistit, zda budou senzory schopné rozpoznat jaké a zda vůbec vozidlo projíždí přes most. Z výsledků na obrázku 3.10 byl experiment hodnocen kladně. Senzory dokázali zaznamenávat přechod velmi malého vozidla, například motocyklů. Ukázalo se, že to není problém a ve skutečnosti je možné zaznamenat i běžce probíhajícího přes most. Na obrázku 3.10 jsou signatury spojené s během, skákáním a chůzí přes most.

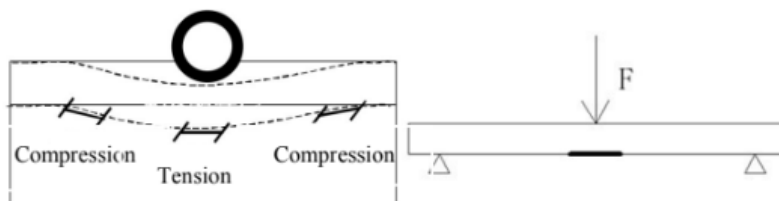
### 3.6.4 Monitorování stavu asfaltu a kalibrace FBG

V tomto experimentu bylo řešeno monitorování vnitřního stavu asfaltové vozovky a kalibrace FBG. Testování bylo provedeno v laboratoři na kusu asfaltové desky, která se skládala ze 3 vrstev, ve kterých se nacházelo vlákno s FBG. Asfaltová testovací deska byla vyrobena ze směsi AC-25, AC-16 a AC-5. Asfaltová směs AC-5 se použila k zaplnění drážky po vložení senzoru napětí FBG. Následně se poté formovala střední vrstva o velikosti 300mm \* 300mm \* 80mm.



Obrázek 3.11: Výroba asfaltové testovací desky s FBG

Na tuto desku byl proveden tříbodový zátěžový test, simulující běžné provozní zatížení (viz. obrázek 3.12). Test byl zaměřen na spodní vrstvu desky, jelikož právě v té se nejčastěji objevují praskliny povrchu.



Obrázek 3.12: Tříbodový ohybový test

Napětí při testování bylo regulováno na standard  $400 \mu\epsilon$ , frekvence nosné vlny byla 10 Hz a testování probíhalo při teplotě  $20^\circ\text{C}$ . Na základě testování byla určena kalibrační rovnice FBG senzoru

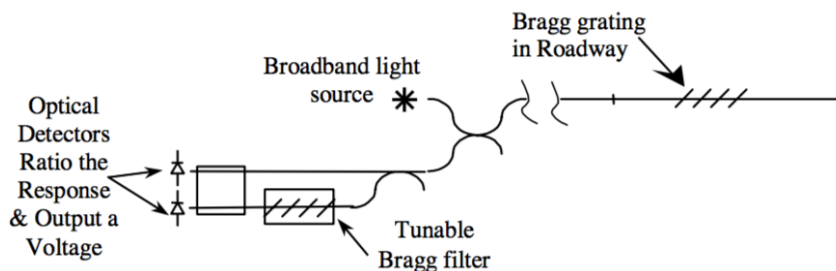
$$Y = 2,9683X - 74,61, \quad (6)$$

kde Y je teoretická hodnota napětí  $[\mu\epsilon]$  a X je nastavená hodnota napětí  $[\mu\epsilon]$ .

Výsledky zkušebních testů ukázaly, že FBG senzor dokáže uspokojit potřeby sledování dynamické reakce silničního provozu. Při pohyblivém zatížení 0,7 MPa a  $20^\circ\text{C}$  dokáže vlákno detekovat deformaci až do hloubky 8 cm pod povrchem.

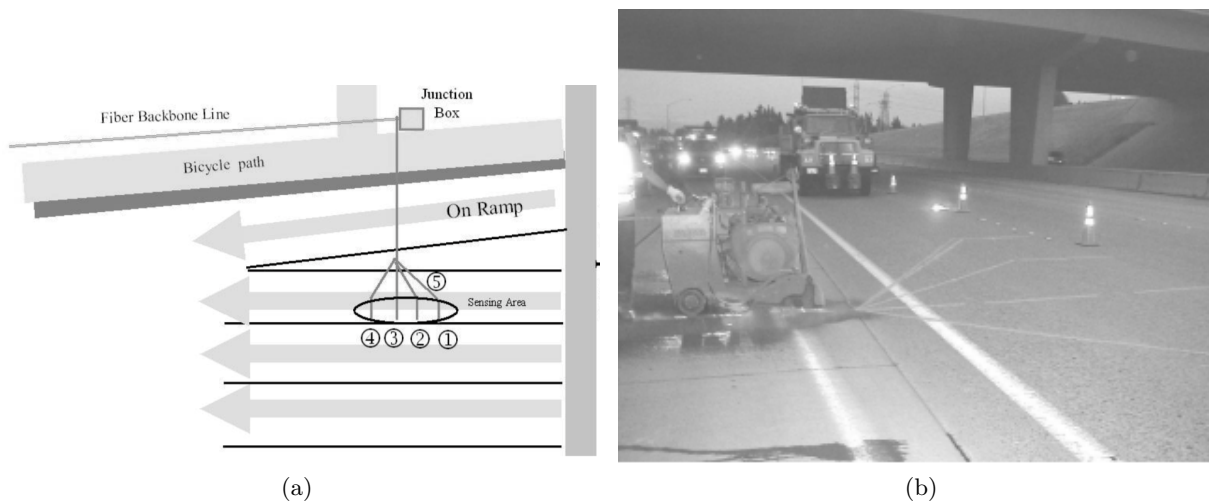
### 3.6.5 Implementace a testování FBG senzorů na dálnici I-84

V tomto experimentu se Ministerstvo dopravy v Oregonu a Blue Road Research rozhodlo otestovat FBG senzory s optickými vlákny k monitoringu dopravy na dálnici I-84 v Portlandu. Tento měřicí systém byl navržen tak, aby tlak ze silnice byl přenesen až k vláknu s FBG a na základě deformace vlákna a změnám jeho vlastností se daly určovat požadované parametry (hmotnost vozidla, rychlost vozidla,...). Systém byl instalován podle schématu na obrázku 3.13.



Obrázek 3.13: Schéma zapojení FBG pro zapojení do provozu [15]

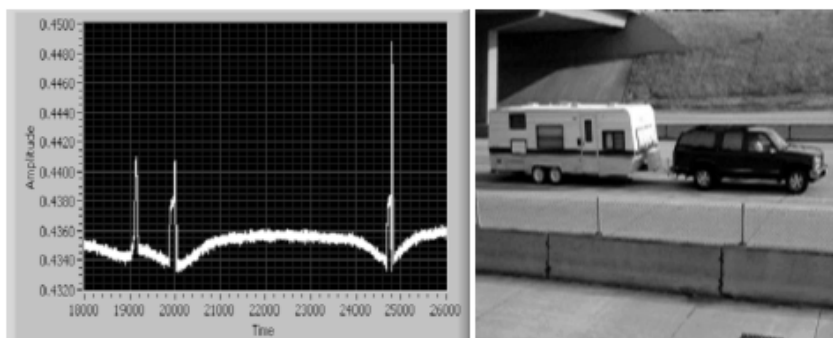
Do vozovky bylo celkově implementováno 5 čidel. 4 čidla sloužila k monitorování dopravy a jedno čidlo (na obrázku 3.14(a) vyznačeno jako 5) bylo implementováno ke sledování teploty povrchu. Vyhodnocovací jednotka pro senzory byla umístěna 483 metrů od silnice a samotná vlákna byla vložena do hloubky 6,985 cm a zalita asfaltovou směsí.



Obrázek 3.14: Rozložení senzorů na vozovce; (a) náčrtek; (b) reálná implementace

Následně byla vlákna otestována v cvičném provozu, kde přes vlákna bylo přejížděno a jednotlivé přejezdy byly zaznamenávány. Signál byl modulovaný frekvencí 20 kHz a více. Přes vlákna přejížděla nákladní vozidla, osobní vozidla, vozidla s přívěsy i cyklisté a ze získaných dat byla určena rychlost i hmotnost zátěže. Na obrázku 3.15 je znázorněn přejezd osobního automobilu Chevrolet Chevette s přívěsem, kde jsou zaznamenány dvě nápravy automobilu

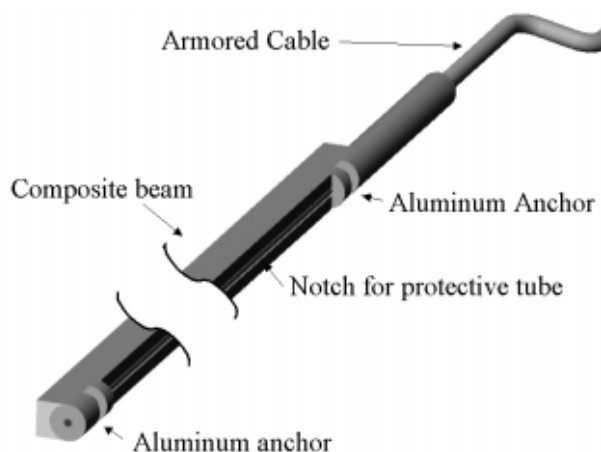
i obě nápravy přívěsu, které se na základě nastavené vzorkovací frekvence sloučily do jedné odezvy.



Obrázek 3.15: Přejezd automobilu s přívěsem a odezva přejezdu [15]

### 3.6.6 Monitorování dopravy na dálnici I-84

Tento článek se zaměřuje na zapuštění dalších vláken s FBG senzory (viz. kapitola 3.6.5) a monitorování hustoty provozu na dálnici I-84. V první fázi tohoto pokusu byly 4 senzory zničené, ale i tak zbylý počet funkčních FBG senzorů byl dostatečný k monitorování životnosti a citlivosti FBG na dálnici. Fyzická životnost FBG vlákna trvá do doby, než je potřebná oprava nebo celková rekonstrukce dálnice. Samotná struktura vlákna s kompozitní ochranou je vidět na obrázku 3.16. Kompozitní ochrana vlákna zvyšuje vláknu životnost a FBG je méně namáháno okolními silami.

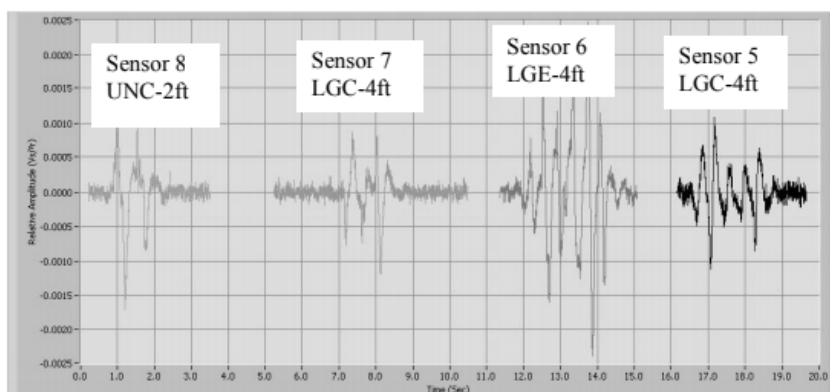


Obrázek 3.16: Struktura FBG senzoru v kompozitní ochraně [16]

Instalace samotných senzorů byla velice jednoduchá. Do povrchu byla opět vyřezána drážka, do které bylo vlákno se senzory umístěno. Celkem byly instalovány 3 typy senzorů

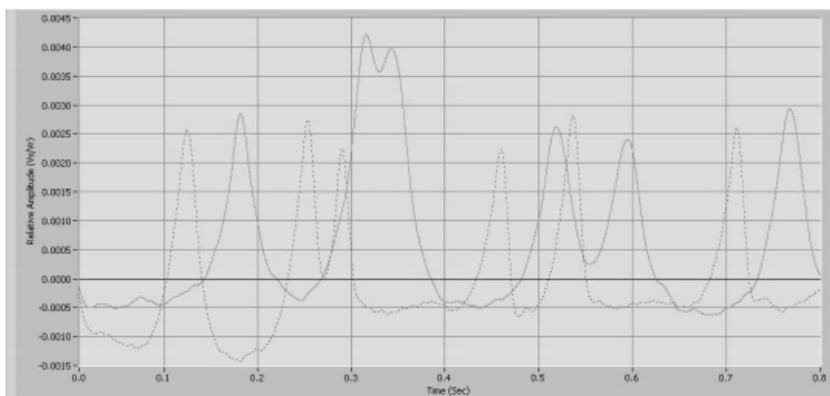
- **LGC** - dlouhé vlákno s kompozitní ochranou
- **LGE** - dlouhé vlákno vylepšené o provozní frekvenci
- **UCN** - vlákno s nezpevněným kompozitem

Na obrázku 3.17 jsou zaznamenány odezvy asi po 10 minutách od vložení vlákna do vozovky se zátěží poskakujícího člověka o hmotnosti 86 kg.



Obrázek 3.17: Odezvy senzorů na člověka [16]

LGE senzor (tečkovaná čára) má nejvyšší citlivost ze všech senzorů. V běžném provozu bylo vypořádováno, že LGE senzor má rychlejší odezvu než senzor LGC při detekci vozidel a rychleji se dostává do svého původního stavu. Rozdíl odezev při přejezdech je patrný na obrázku 3.18. Na základě zabudovaných senzorů a jejich datům z dálnice I-84 je možné provádět měření hustoty dopravy a vyhodnocování dalších žádoucích informací.

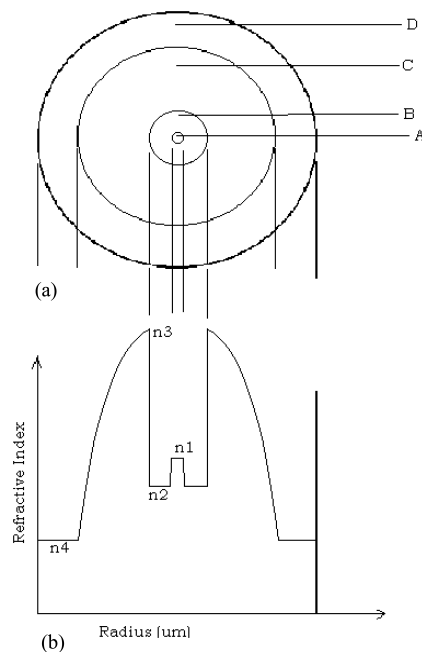


Obrázek 3.18: Odezvy senzorů v provozu [16]

### 3.6.7 Speciální snímač optických vláken pro měření zatížení kol vozidel na dálnicích

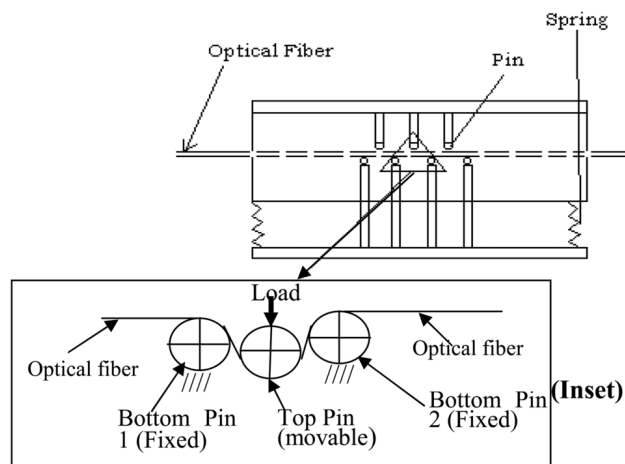
Přesné měření statické nápravy nebo zatížení kol je dlouhodobě hlavním cílem inženýrů. Statická hmotnost vozidla se používá jako základ pro analýzu a návrh vozovky. Jenže statické vážení vozidel na dálnicích má několik nevýhod - včetně časové náročnosti, vysoké ceny a zároveň na silně frekventovaných silnicích i vznik nebezpečných situací. Koncept WIM (Weigh-in-motion) byl představen již před více než 60 lety a má za cíl určovat statické hmotnosti vozidel bez zastavení provozu. V posledních pěti desetiletích bylo vyvinuto několik různých systémů WIM, které byly uvedeny do provozu. Tři systémy, které se nejvíce používají, jsou kapacitní snímače, piezoelektrické snímače a zatěžovací snímače.

V tomto experimentu bylo testováno speciální vlákno se dvěma jádry. Tento experiment spočíval ve stlačování vlákna na více místech zároveň a měření intenzity světla pomocí OTDR a Rayleighova rozptylu. U normálního vlákna by došlo při ohybu k vyvázání světla z jádra, čímž by se pouze snížila intenzita na výstupu a zbylé světlo by bylo ztraceno. A proto bylo zapotřebí, aby záření vyvázané z jádra optického vlákna nebylo úplně ztraceno a bylo možné ho dále snímat. Proto bylo vyvinuto vlákno s dvěma jádry (na obrázku 3.19 označeno jako A a C), které fungovalo na principu vyvázání světla z jádra A přes plášť B až do jádra C, kudy signál dorazil až na konec trasy a bylo možné ho snímat.



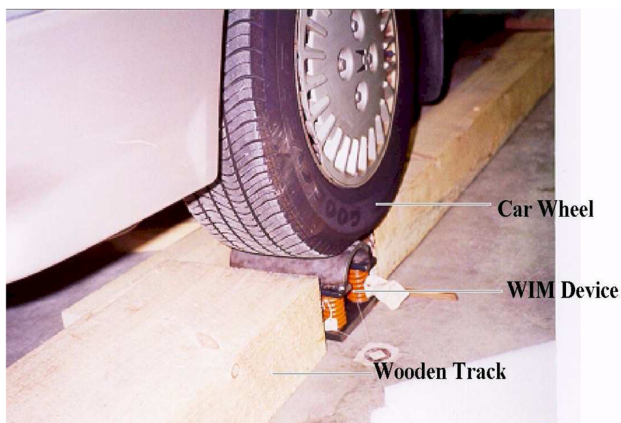
Obrázek 3.19: Dvojitě jádrové vlákno; (a) průřez; (b) schéma profilu indexu lomu [21]

K testovacím účelům v laboratoři byl sestaven ohýbací mechanismus založený na pružinách, který dokázal ohýbat vlákno ve více místech zároveň. Aby docházelo ke správnému vyvázání světla z vnitřního jádra do vnějšího byly zvoleny ohýbací kolíky o průměru 0,953 cm, které byly od sebe vzdáleny 2,07 cm.

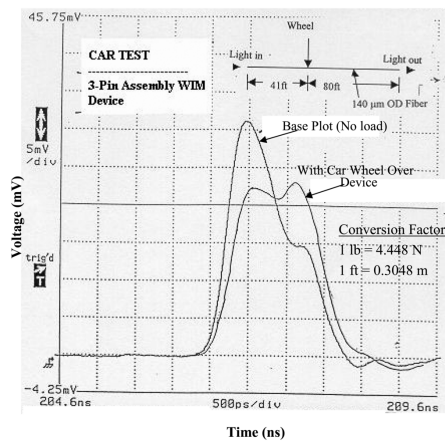


Obrázek 3.20: Ohýbání vlákna třemi kolíky [21]

Testování probíhalo v laboratoři, kde byl senzor umístěn mezi dřevěné trámy, po kterých přejíždělo vozidlo (viz. obrázek 3.21(a)). Výsledky nasnímané z osciloskopu jsou vyobrazeny na obrázku 3.21(b). Před přejezdem je patrné, že byl na výstupu pouze jeden signál, který byl stejný jako na vstupu. Po přejezdu je vidno, že levý vrchol (signál v jádře A) zeslábl a naopak se objevil druhý vrchol. Ten je tvořen světlem, které se vyvázalo z vnitřního jádra A do vnějšího jádra C. Snížení intenzity levého vrcholu udává míru velikosti zátěže pneumatiky.



(a)



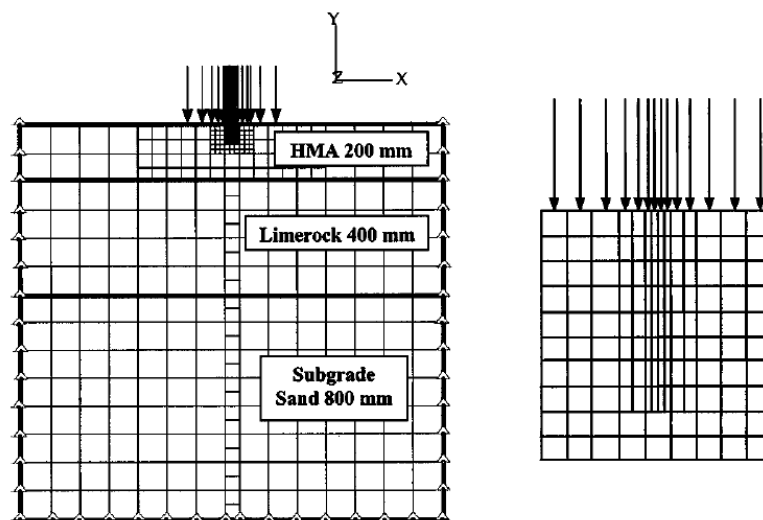
(b)

Obrázek 3.21: Testování zařízení; (a) přejezd přes senzor; (b) výstup na osciloskopu [21]

### 3.6.8 Monitorování dopravy pomocí sítě optických vláken

V této studii Ministerstvo dopravy na Floridě hledalo alternativu k piezoelektrickým sensorům, protože ty byly náchylné na selhávání z důvodů koroze, výpadků napájení a byly ovlivňovány okolními jedoucimi vozidly. Tyto senzory byly rozmístěné zhruba na 350 místech po celé Floridě a všechna data o provozu (kategorie vozidel, počty náprav,...) byla shromažďována na statistickém úřadu v Tallahassee. Ministerstvo dopravy požadovalo alternativní způsob měření, který nebude ovlivňovaný okolními jevy a proto byl vypsán třífázový výzkumný program. V tomto programu bylo účelem vyvinout technologii a následně ji otestovat a zjistit vlastnosti mezi testy v laboratoři a testy v reálném provozu, aby tyto výsledky mohli být v budoucnu použity v geometricky podobných senzorech.

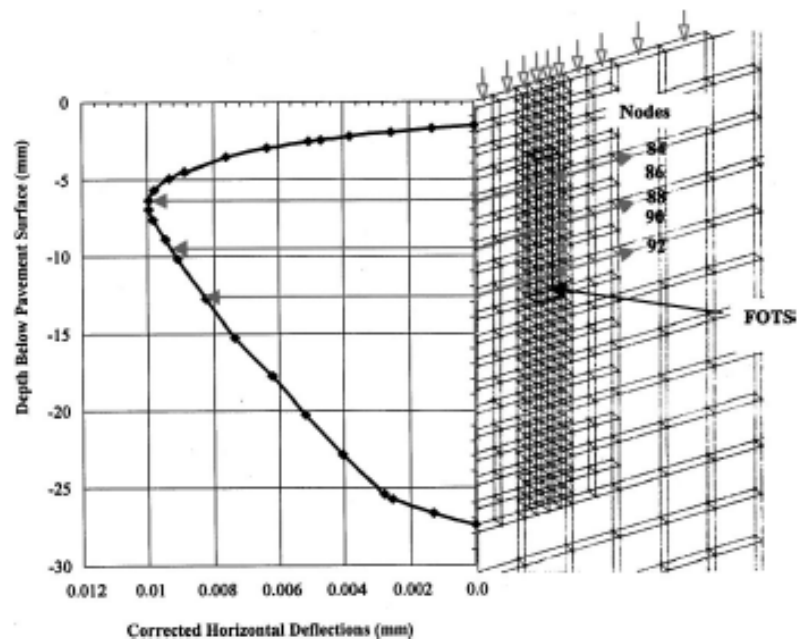
Jedním ze tří modelů byl model založený na síti z optických vláken znázorněný na obrázku 3.22.



Obrázek 3.22: Struktura testovaného senzoru [20]

Testovací senzor měl rozměry 736 x 711 mm a skládal se z 1398 měřících bodů, které byly umístěny do třívrstvé struktury asfaltu vysoké 1100 mm. Vlákná ve směru osy X (viz. obrázek 3.22) byla zafixována pevně, zatímco vlákna vedoucí ve směru osy Y byla flexibilní, což byl i směr přejezdů vozidel. Po najetí vozidla se ve vláknech změnila intenzita procházeného světla a tím byl přejezd zaznamenán.





Obrázek 3.23: Model 3 horizontálních výkyvů senzoru při tlaku pneumatiky 245 kPa [20]

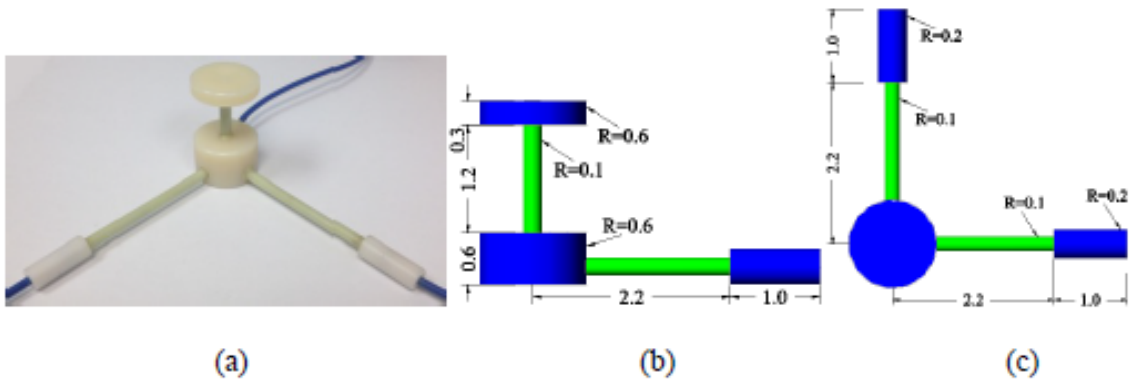
Po laboratorních testech byly senzory aplikovány do vozovky, kde byla vyhotovena drážka o hloubce 15,9 mm, do které byla vlákna umístěna a následně přejížděna automobilem Ford F-150.

Na základě laboratorních testů a testů v reálném prostředí bylo vyhodnoceno, že tato struktura je spolehlivá a použitelná místo piezoelektrických senzorů.

### 3.6.9 Optické vlákno s FBG jako snímač pro měření rychlosti a rozvoru náprav

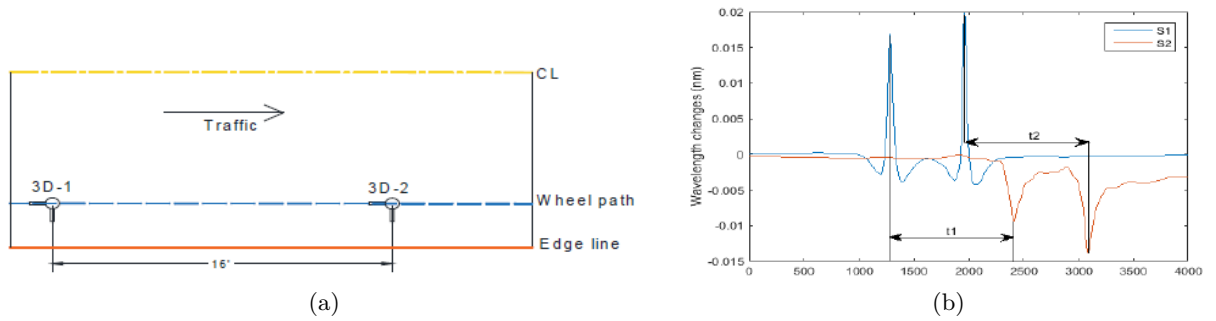
V této studii byly do vozovky položeny trojrozměrné snímače FBG (3D GFRP-FBG), které byly uloženy do skleněných optických vláken. Cílem této studie bylo měření rychlosti a rozvoru náprav vozidel. Experimentální výsledky této studie dosahovali spolehlivosti měření minimálně 95%.

Aby nedošlo k poškození senzoru, musela být vlákna zabalena do ochranného pouzdra. Ochranných pouzder byl polymer zpevněný skleněným vláknem (GFRP), který se využívá ve stavebních aplikacích a poskytuje trvalou a spolehlivou variantu ochrany pevnou jako ocel. Na obrázku 3.24 je vyfocen trojrozměrný snímač, včetně nákresu jeho bokorysu a půdorysu. Komponent s krátkým vláknem má za úkol měřit vertikální namáhání. Senzorické větve s dlouhým vláknem slouží k detekci vozidel, principem snímání podélného a příčného napínání. Pod pojmem podélný směr se rozumí směr dráhy vozovky a příčný směr znamená vlákno instalované od jedné strany jízdního pruhu k druhé straně.



Obrázek 3.24: Geometrický design 3D GFRP-FBG; (a) fotka; (b) bokorys; (c) půdorys [17]

K detekci vozidla a jeho rozvoru náprav je zapotřebí implementovat do vozovky minimálně 2 senzory. Aby byla minimalizovaná systematická chyba instalace, měla by vzdálenost těchto senzorů být co největší. Tím se zvýší přesnost měření rychlosti. V této studii byly senzory umístěny 4,88 m od sebe ve směru jízdy vozidel (viz. obrázek 3.25(a)).



Obrázek 3.25: (a) umístění senzorů; (b) výstup na osciloskopu po přjetí dvou náprav

Na obrázku 3.25(b) je znázorněn přejezd dvou náprav přes senzor. Na základě těchto odezev se dá vypočítat rychlost vozidla. Rychlost vozidla se vypočte dle vztahu

$$v = \frac{D}{t}, \quad (7)$$

kde  $D$  je vzdálenost mezi senzory (4,88 m) a  $t$  je čas mezi dvěma odezvami senzorů. Jelikož při měření byly naměřeny dva časové intervaly přejezdů, přesnost výpočtu se dá zvýšit použitím obou intervalů. Vztah pro výpočet se tak změní na

$$v = \frac{\left(\frac{D}{t_1} + \frac{D}{t_2}\right)}{2}. \quad (8)$$

Dalším určovaným parametrem byl rozvor náprav vozidla. K určení tohoto parametru je zapotřebí znát rychlost vozidla a časový interval mezi dvěma detekovanými průjezdy. Rozvor náprav

se vypočte vztahem

$$WB = v \cdot t, \quad (9)$$

v případě dvou náprav a dvou časových intervalů pomocí vztahu

$$WB = \frac{(v \cdot t_1 + v \cdot t_2)}{2}. \quad (10)$$

K otestování instalovaných senzorů byl použit tahač s 5 nápravami, který vážil 36,29 tun.



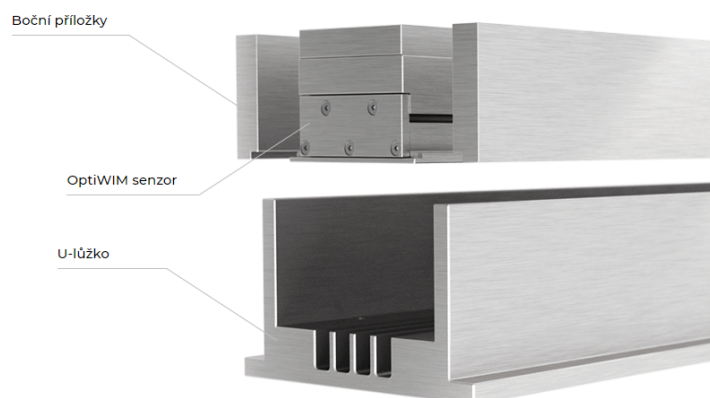
Obrázek 3.26: Testovací vozidlo

Tahač přešel senzory různou rychlostí (40,2 km/h, 56,3 km/h a 72,4 km/h). Ze změřených rychlostí byla vypočtena vzdálenost jednotlivých náprav vozidla. Nápravy byly vzdálené 5,19 m, 1,38 m, 10,29 m a 1,27 m. Výsledky z 3D senzorů byly následně porovnány s údaji z radaru. Po porovnání výsledků bylo stanoveno, že přesnost měření byla vyšší než 95%.

### 3.6.10 OptiWIM

OptiWIM je celosvětově první senzor sloužící k dynamickému monitorování provozu na silnicích. Funguje na principu měření změny napínání vlákna. Tento systém dokáže jako první monitorovat celou šíři vozovky a dokáže zvážit vozidla s nejvyšší možnou přesností v každém bodě na vozovce. Označuje se jako weigh-in-free-flow systém a je necitlivý vůči okolním změnám teplot.

Senzor pracuje na čistě optickém principu, jelikož veškerá elektronika se nachází pouze v řídicí jednotce a snímání dat probíhá pouze v senzoru s optickými vlákny. OptiWIM je absolutně pasivní s maximální radiofrekvenční imunitou neboli odolností proti magnetickému poli.



Obrázek 3.27: Složení senzoru OptiWIM [18]

Díky revolučnímu provedení senzoru, který se skládá z několika částí (viz. obrázek 3.27), je tento senzor schopen monitorovat a měřit šířku vozidla, detekovat podhuštěné pneumatiky nebo detekovat dvojmontážní nápravy. Tyto data jsou pak využita k rozvoji přímého pokutování přetížených, případně špatně naložených vozidel a umožňuje vybírání tzv. mýta-za-tunu. Mýto-za-tunu je systém platby mýta u nákladní dopravy, kdy platí určitý tarif za určitou váhu vozidla. Samotný optický senzor má předpokládanou životnost okolo 10 let a k jeho výměně poté není potřeba frézovat vozovku, jelikož senzor se nachází uprostřed měřicího pásu a dá se snadno vyjmout a vyměnit nedestruktivně z okraje vozovky.

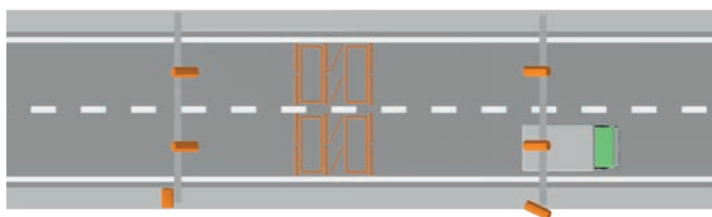


Obrázek 3.28: Systém zabudovaný ve vozovce [18]

### 3.6.11 UnicamWIM

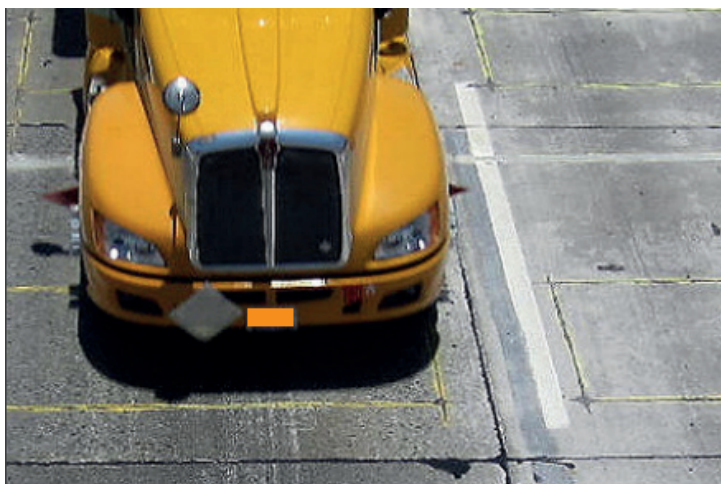
UnicamWIM je komplexní aplikace, která slouží pro měření a vážení vozidel jedoucích různou rychlostí. Systém měří hmotnost jednotlivých kol, náprav i celkovou hmotnost vozidla, které projede přes senzor. Všechna měření probíhají při normálních rychlostech, tudíž nedochází k žádnému zbrždění dopravy a ze získaných dat se dá určovat i rychlost jedoucích vozidel.

Při instalaci systému WIM se do vozovky umístí několik optických senzorů. Pro přesné a certifikované měření se vlákna musí vložit v lokalitě, která odpovídá nastaveným vlastnostem senzorů. Pro přímé vymáhání pokut, se senzory umístí například do takzvané třířadové konfigurace (3.29). Pro běžné měření stačí pouze dvouřadá konfigurace senzorů, případně střídavě rozložené senzory s nižší a vyšší citlivostí a přesností měření.



Obrázek 3.29: Obousměrná konfigurace třířadového systému [19]

Údržba systému je závislá na stavu vozovky (tvoření výmolů, rýh, poklesu povrchu,...). Musí docházet k pravidelné kontrole a případné recalibraci, kterou je možno provádět manuálně přímo v terénu, případně poloautomaticky či dokonce automaticky. Všechna zaznamenaná data se uchovávají v lokální či centrální databázi pro každé vozidlo zvlášť. Tento systém je například instalován v Praze, kde se v roce 2015 nacházel na 8 komunikacích a monitoroval dopravu v 17 jízdnicích pruzích. Cílem je monitorovat komunikace směřující do města, aby se předešlo poškození vozovky způsobenému přetíženými vozidly.



Obrázek 3.30: Obousměrná konfigurace třířadového systému [19]

## 4 Možnosti realizace mobilního pásu

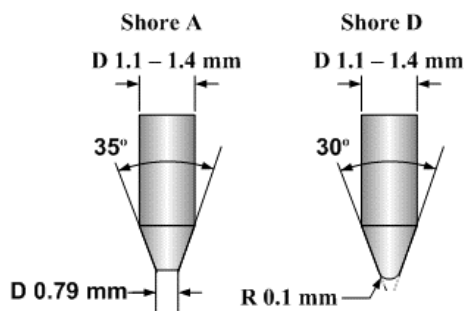
### 4.1 Zalevací materiály

Pro zalévání vlákna s FBG jsou nejprve vybírány a následně otestovány různé silikony. Podmínkou výběru je, aby materiál vytvrdl i při běžné pokojové teplotě 23 °C - 25 °C. Následně na vybrané materiály s různou tvrdostí na stupnici Shore, je prováděno experimentální testování ve formě přejezdů automobily na asfaltovém podkladu.

Vybranými a otestovanými materiály jsou silikony od firmy ELCHEMCo. Prvním testovaným materiálem je silikon ZA 50 LT, PU430-PH30, PU310-PH27, PU324-PH30 a MC622-W360.

#### 4.1.1 Stupnice Shore

Měření tvrdosti podle Shore slouží pro popsání tvrdosti nekovových plastových materiálů. Princip zjišťování tvrdosti spočívá ve vtlačování tvrdoměru s hrotem typu A, ze kterého vznikne stupnice označovaná jako Shore A. Hrot typu A se používá na měkčí materiály, zatímco tvrdoměr s typem hrotu D se používá pro tvrdší materiály a hodnoty se nacházejí na stupnici Shore D.



Obrázek 4.1: Hroty pro měření tvrdosti Shore

#### 4.1.2 ZA 50 LT

ZA 50 LT je dvousložkový aditivní silikonový kaučuk, který vytvrzuje za pokojové teploty. Složky kaučuku se v poměru 1:1 řádně promíchají a následně jsou připraveny k použití. Po následném vytvrzení má silikonový kaučuk modrou barvu.

Tabulka 4.1: Vlastnosti materiálu ZA 50 LT

Barva	Modrá
Tvrlost Shore A	50 Shore A
Čas odformování	180 minut
Pevnost v tahu	4 MPa
Poměr míchání	1:1
Prodloužení	320 %
Chemické složení	Silikon

#### 4.1.3 PU430-PH30

Tato polyuretanová zalévací hmota se skládá ze dvou složek a neobsahuje žádná rozpouštědla. Jednou složkou je polyuretanová pryskyřice PU430, která se míchá v poměru 10:1 s tvrdidlem PH30. Nejčastější použití má díky své tvrdosti a adhesi ke sklům, plastům, keramice a kovům k zapouzdřování elektronických komponent, která jsou citlivá na termo-mechanické namáhání. Při pokojové teplotě dohází k úplnému vytvrzení po 4 – 5 dnech. Po vytvrzení je barva hmoty béžová.

Tabulka 4.2: Vlastnosti materiálu PU430-PH30

Barva	Béžová
Tvrlost Shore A	48 Shore A
Čas odformování	1200 minut
Maximální provozní teplota	130°C
Poměr míchání	10:1
Chemické složení	Polyuretan

#### 4.1.4 PU310-PH27

PU310-PH27 je dvousložková polyuretanová hmota skládající se z pryskyřice PU310 a tvrdidla PH27. Tyto dvě složky se smíchají v poměru 10:2. Díky svým vlastnostem je vhodná pro zalévání malých transformátorů, kondenzátorů a různých napěťových regulátorů. Vytvrzování při pokojové teplotě trvá 12 - 16 hodin, aby byla hmota připravena k použití. Po vytvrzení má hmota žlutou barvu.

Tabulka 4.3: Vlastnosti materiálu PU310-PH27

Barva	Žlutá
Tvrlost Shore A	70 Shore A
Čas odformování	720 minut
Maximální provozní teplota	100°C
Poměr míchání	10:2
Chemické složení	Polyuretan

#### 4.1.5 PU324-PH30

Dvousložkový tixotropní polyuretanový systém, který neobsahuje abrasivní plniva a rozpouštědla. Před zaléváním je vhodné nádobu nejprve vysušit a lehce předežhřát. Obě složky jsou velmi citlivé na vlhkost. Díky vysoké tvrdosti 78 Shore A je materiál vhodný pro zapouzdřování elektrických a automobilových komponent. Čas odformování je 4 - 6 hodin a následné dotvrzování trvá okolo 10 hodin. Barva materiálu po vytvrzení je žlutohnědá.

Tabulka 4.4: Vlastnosti materiálu PU324-PH30

Barva	Žlutohnědá
Tvrdost Shore A	78 Shore A
Čas odformování	240 minut
Maximální provozní teplota	130°C
Poměr míchání hmotnostně	100:19
Poměr míchání objemově	100:21
Chemické složení	Polyuretan

#### 4.1.6 MC622-W360

MC622-W360 je dvousložkový plněný epoxidový systém, který má velmi vysokou tvrdost udávanou na stupnici Shore D. Neobsahuje žádná rozpouštědla a halogeny. Je vysoce odolný vůči teplotním šokům a má dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Díky vysoké tvrdosti je vhodný k zapouzdření elektrických motorů, případně ponorných čerpadel apod. Dotvrzování trvá 6 - 8 hodin a barva epoxidového systému po vytvrzení je za použití modrého vytvrzovačla zelená.

Tabulka 4.5: Vlastnosti materiálu MC622-W360

Barva	Zelená
Tvrdost Shore D	85 Shore D
Čas odformování	1200 minut
Maximální provozní teplota	155°C
Poměr míchání hmotnostně	100:9,5
Poměr míchání objemově	100:17,5
Chemické složení	Epoxid



#### 4.1.7 Zalévání a testování materiálů

K testovacím účelům jsou vyrobeny odlitky o délce 25 cm a výšce 1 cm (viz. obrázek 4.2).



Obrázek 4.2: Zalité hmoty ve formách

Po zalití silikonu do forem jsou odlitky vytvrzovány při pokojové teplotě 6 dní a poté je proveden zátěžový test. Odlitky (viz. obrázek 4.3) jsou položeny na tvrdý asfaltový povrch a každý odlitek je 20x přejet osobním automobilem Škoda Octavia II. Po přejezdech automobil na jednotlivých vzorcích několikrát prudce zabrzdí a je pozorována deformace a opotřebení silikonových odlitků.

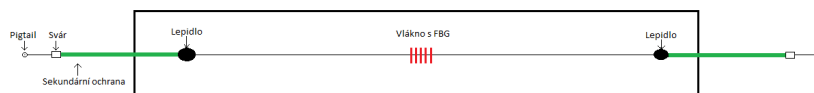


Obrázek 4.3: Pneumatika automobilu na vzorku

Ani u jednoho testovacího vzorku nejsou prokázány žádné větší známky poškození. Na základě této informace je rozhodnuto, že pro další experimenty jsou použity materiály ZA 50 LT a PU430-PH30. Tyto materiály přesvědčily svou odolností, tvrdostí, pružností a ideální ohebností.

## 4.2 Mobilní pásy bez ochrany optického vlákna

Tento experiment slouží k otestování optického vlákna zalitého do vybraných materiálů. Sestrojeny jsou dva měřicí pásy kvádrotitého tvaru. Délka 1 m, výška 1,5 cm. Uprostřed těchto pásů se nachází optické vlákno s FBG, které je na obou koncích ochráněno sekundární ochranou. Vlákno s FBG senzorem uvnitř pásů je ochráněno pouze použitým zalévacím materiálem. Měřicí pásy jsou realizovány podle schématu na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Schéma sestavení měřicího pásu

Pro výrobu jsou použity zalévací materiály ZA 50 LT a PU430-PH30, dvě optická vlákna s FBG, sekundární ochrany na vlákna, dvousložkové lepidlo, ochrany svárů a pigtaily pro připojení měřicí jednotky.

Tabulka 4.6: Vlastnosti jednotlivých pásů

	Pás č.1	Pás č.2
Materiál	ZA 50 LT	PU430-PH30
Vlnová délka FBG vlákna [nm]	1547,563	1555,106
Propustnost FBG vlákna [%]	91,687	88,485
FWHM [pm]	207,378	219,723
OSNR [dB]	8,473	7,423

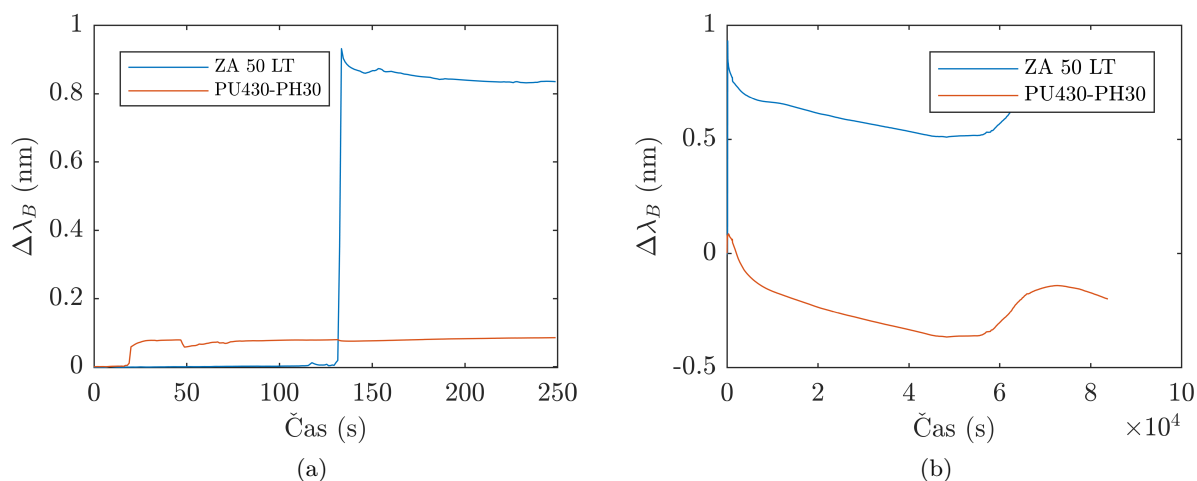
### 4.2.1 Vytvrzování pásů

Během vytvrzování pásů je sledována změna FBG vlnové délky. Vytvrzování probíhá 24 hodin při běžné pokojové teplotě a změny vlnových délek jsou zaznamenány v následující tabulce.

Tabulka 4.7: Změny vlnových délek

	Pás č.1	Pás č.2
Materiál	ZA 50 LT	PU430-PH30
Vlnová délka FBG vlákna před zalitím	1548,729	1556,452
Vlnová délka FBG vlákna po vytvrzení	1549,425	1556,251

Změny vlnových délek po zalití jednotlivými materiály a průběh změn při vytvrzování je znázorněn na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: Změna vlnové délky; (a) při zalití vlákna; (b) při vytvrzování

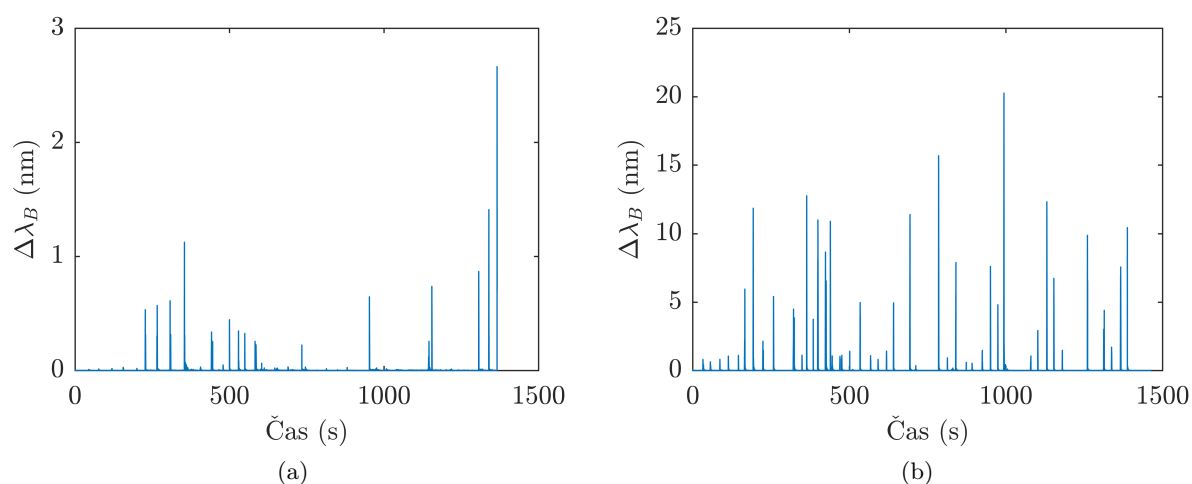
#### 4.2.2 Testování pásů na přejezdy automobilů

Testování pásů je prováděno za deštivého počasí v kampusu VŠB-TU Ostrava. Na vozovku je umístěna gumová podložka, na kterou jsou upevněny testované měřicí pásy, které jsou následně přejížďeny výhradně automobilem Škoda Octavia II.



Obrázek 4.6: Testování měřících pásů, směr jízdy zleva doprava

Během zpracování dat se ukazuje výrazná šumová složka, kterou je nutné odfiltrovat pásmovou propustí s mezní frekvencí 0,2 Hz, která odstraní složku šumu způsobenou pamětovým efektem materiálu.

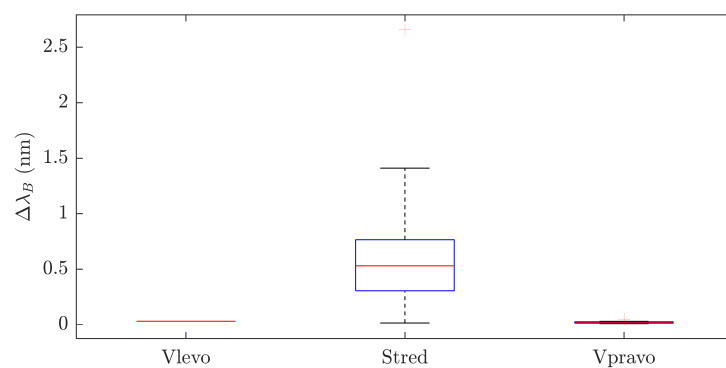


Obrázek 4.7: Jednotlivé odezvy pásů; (a) ZA 50 LT; (b) PU430-PH30

Z jednotlivých odezev je vidět, že pás z materiálu ZA 50 LT není schopen detekovat všechny průjezdy, zatímco druhý testovaný pás detekuje vše, ale s velmi vysokou citlivostí a velkou změnou vlnové délky vlákna. Pás ZA 50 LT detekoval pouze 28 přejezdů z celkových 42 přejezdů. Výsledky zaznamenaných přejezdů jsou uvedeny v následujících tabulkách. Strany přejezdů jsou zvoleny z pohledu jízdy zleva doprava na obrázku 4.6 (levá strana - blíže měřicímu stanovišti).

Tabulka 4.8: Přejezdy po pásu z ZA 50 LT

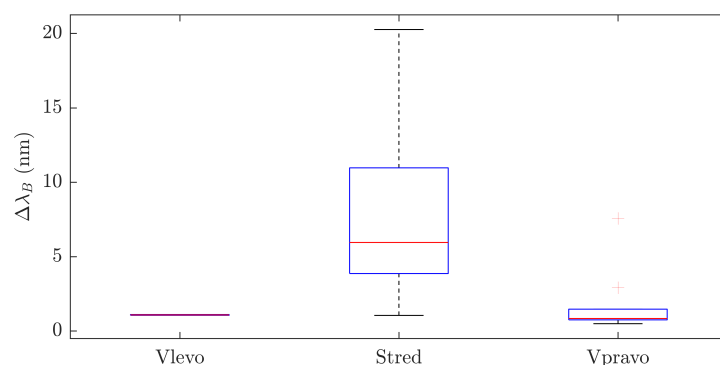
Velikost odezvy ZA 50 LT			
Rychlost přejezdu	Vlevo	Střed	Vpravo
	Velikost [nm]	Velikost [nm]	Velikost [nm]
0 – 20 km/h		1,124	0,0079
		0,336	0,012
		0,25	0,016
		0,22	
		0,73	
		0,6461	
		1,41	
20 – 35 km/h	0,03	2,66	
		0,026	0,029
		0,34	0,025
		0,869	0,021
35 a více km/h			0,013
		0,53	0,048
		0,57	0,017
		0,61	0,011
		0,44	
		0,324	
		0,014	



Obrázek 4.8: Krabicový graf zaznamenaných přejezdů

Tabulka 4.9: Přejezdy po pásu z PU430-PH30

Velikost odezvy PU430-PH30			
Rychlost přejezdu	Vlevo	Střed	Vpravo
	Velikost	Velikost	Velikost
0 – 20 km/h	1,052	2,039 4,488 8,652 10,9 1,4 4,397 10,44	0,79 0,62 0,8
20 - 35 km/h	1,106	1,046 11,85 5,41 3,689 4,887 1,074 1,411 4,944 12,31 9,873	0,7936 0,84 0,49 1,464
35 a více km//h		5,951 12,76 10,99 11,38 15,68 7,598 4,806 20,27 6,643 1,696	1,102 1,042 0,5 2,91 1,467 7,559



Obrázek 4.9: Krabicový graf zaznamenaných přejezdů

Na základě testování a analýzy měření je určeno, že pro další experimenty bude použit materiál ZA 50 LT, který neměl tak vysokou změnu vlnových délek, která by v provozu vedla k následnému zničení vlákna a samotné FBG vlákno je nutno ochránit více než jen samotným zalitím do materiálu.

### 4.3 Mobilní pásy s optickým vláknem v trubičce

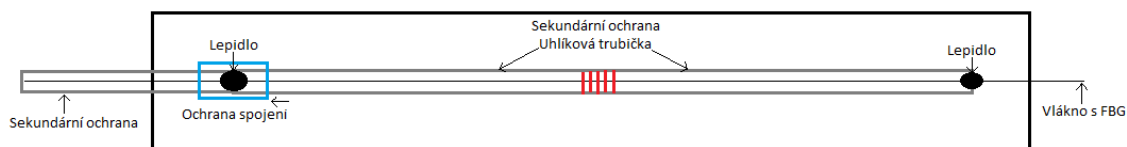
#### 4.3.1 Výroba měřících pásů

Při výrobě měřících pásů v tomto experimentu jsou použita optická vlákna s FBG o vlnových délkách 1540,104 nm a 1550,224 nm, uhlíková trubička, trubička s vlastnostmi sekundární ochrany, dvousložkové lepidlo a vlákno s konektorem. Použitá vlákna s FBG mají následující parametry:

Tabulka 4.10: Vlastnosti použitých FBG vláken

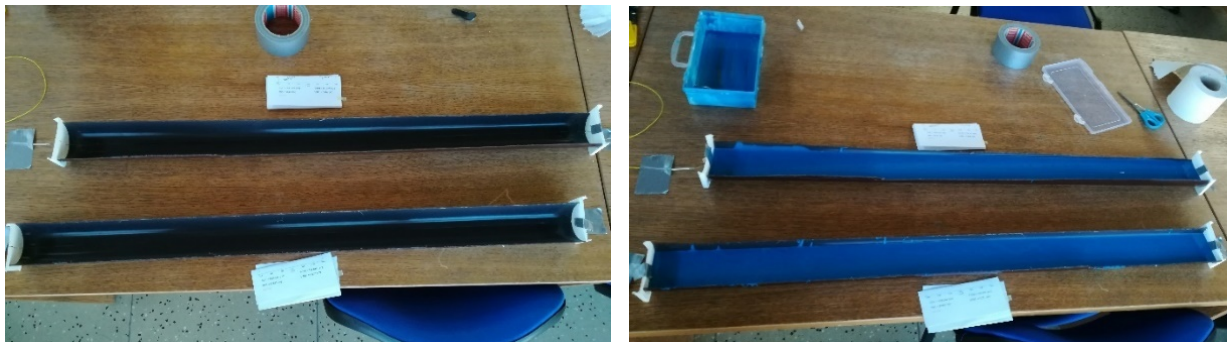
	Vlákno s uhlíkovou ochranou	Vlákno se sekundární ochranou
Vlnová délka FBG [nm]	1540,104	1550,224
Propustnost [%]	90,04	90,833
FWHM [pm]	274,327	276,088
OSNR [dB]	6,496	6,277

Měřící pásy jsou realizovány podle následujícího schématu.



Obrázek 4.10: Schéma sestrojení měřícího pásu

Při výrobě měřících pásů o délce 1 metr je na vlákna nasazena sekundární ochrana (uhlíková ochrana) a vlákna jsou ve formách dostatečně předeprnuta. Následně jsou zalita silikonovým kaučukem ZA 50 LT a ten je vytvrzován po dobu 24 hodin při pokojové teplotě.



Obrázek 4.11: Nezalité vlákno a zalité vlákno silikonem ZA 50 LT

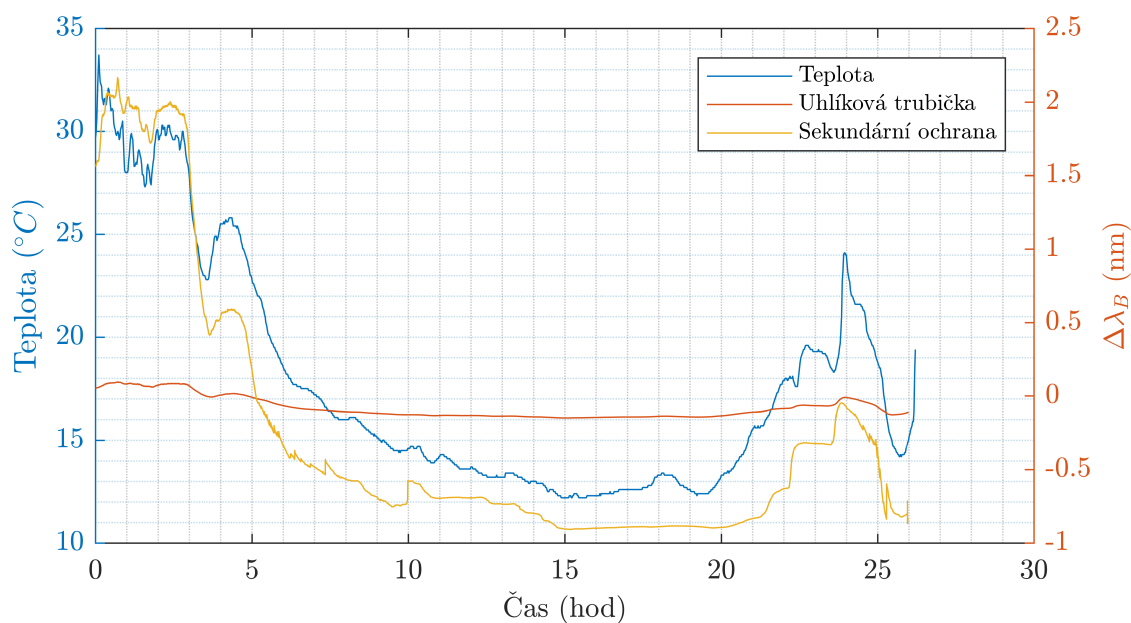
#### **4.3.2 Teplotní vlastnosti měřené ve venkovním a vnitřním prostředí**

Testování na teplotní citlivost jednotlivých pásů je prováděno za pomoci dvou experimentů. První experiment se odehrává venku a monitoruje se teplota venkovního prostředí a posun vlnové délky v závislosti na teplotě. Ve druhém experimentu jsou pásy umístěny do uzavřené místnosti a je opět prováděno měření teploty a posunu vlnové délky.

##### **Testování ve venkovním prostředí**

Testování ve venkovním prostředí probíhalo 26 hodin, během kterých monitoruji změnu vlnové délky a teplotu. Teplota během měření kolísá v rozmezí od 12,2 °C do 33,7 °C. Teplotní průběh měření a změny vlnových délek u jednotlivých pásů jsou vyobrazeny na grafu 4.12.



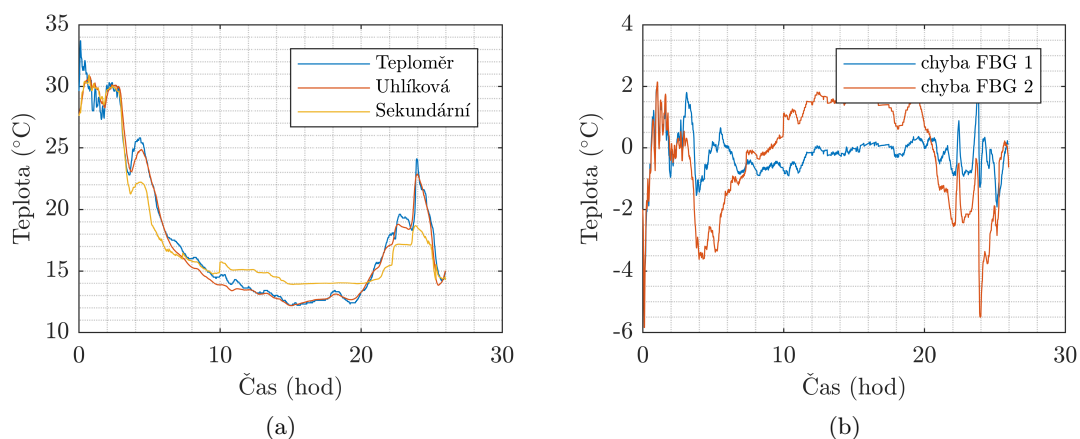


Obrázek 4.12: Teplota venkovního prostředí a průběhy změn vlnových délek

Z výsledných grafů a určení teplotních koeficientů  $k_\epsilon$  (z rovnice 3) pro oba pásy při stejné počáteční teplotě  $T$  vyplývá, že vlákno v sekundární ochraně je výrazně více namáháno vlivem okolní teploty a je na teplotu vnějšího prostředí 13,8x citlivější než vlákno ochráněné uhlíkovou trubičkou.

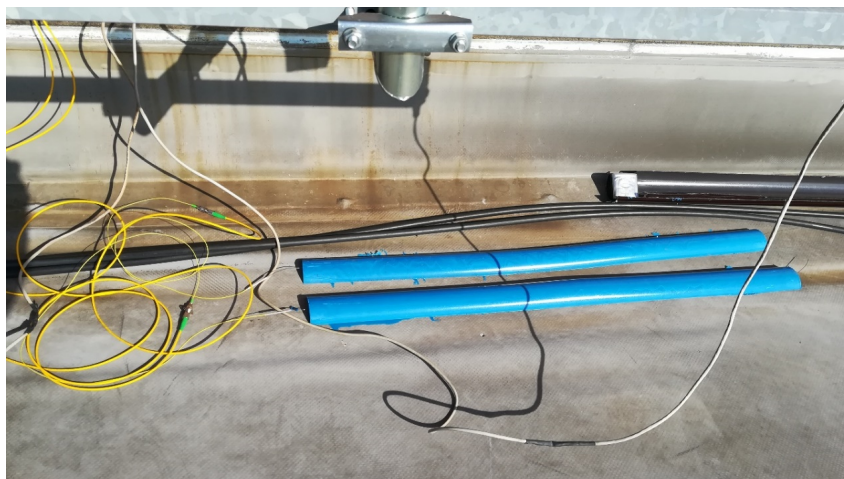
Koeficient  $k_\epsilon$  pro uhlíkovou trubičku: 13 pm/°C

Koeficient  $k_\epsilon$  pro sekundární ochranu: 180 pm/°C



Obrázek 4.13: Teplotní citlivost; (a) se stejnou počáteční teplotou; (b) chyby FBG teplotní citlivosti

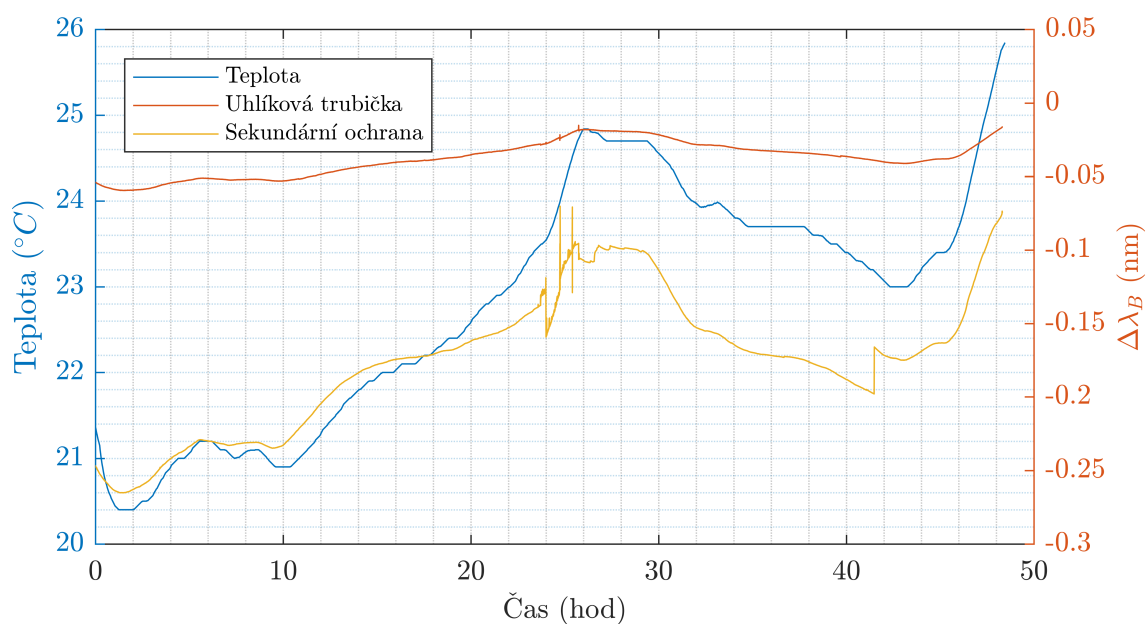




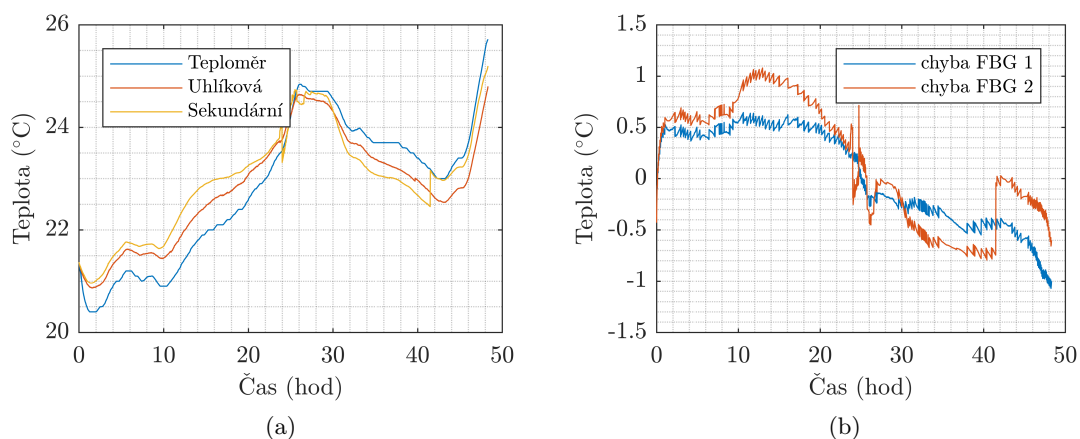
Obrázek 4.14: Umístění pásu a teplotního čidla ve venkovním prostředí

### Testování v laboratoři

Testování teplotních změn v laboratoři probíhá 48 hodin a 20 minut a změny teplot při tomto experimentu nejsou tolik kolísavé jako při měření ve venkovním prostředí. Teploty se pohybují v rozmezí od 20 °C do 26 °C. Vývoj teploty a průběhy změn vlnových délek jednotlivých pásů jsou vyobrazeny v grafu 4.15.



Obrázek 4.15: Teplota v laboratoři a průběhy změn vlnových délek



Obrázek 4.16: Teplotní citlivost; (a) se stejnou počáteční teplotou; (b) chyby FBG teplotní citlivosti

Z rovnice 3 jsou určeny koeficienty teplotní citlivosti  $k_\epsilon$ .

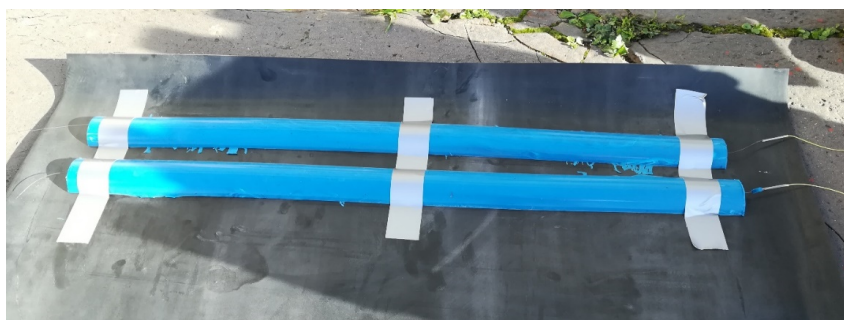
Koeficient  $k_\epsilon$  pro uhlíkovou trubičku:  $11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$

Koeficient  $k_\epsilon$  pro sekundární ochranu:  $45 \text{ pm}/^\circ\text{C}$

V experimentu jsem potvrdil, že FBG vlákno s uhlíkovou trubičkou je výrazně méně citlivé na změny okolních teplot než vlákno se sekundární ochranou (viz. obrázek 4.16).

#### 4.3.3 Odolnost pásů na přejezd automobilu

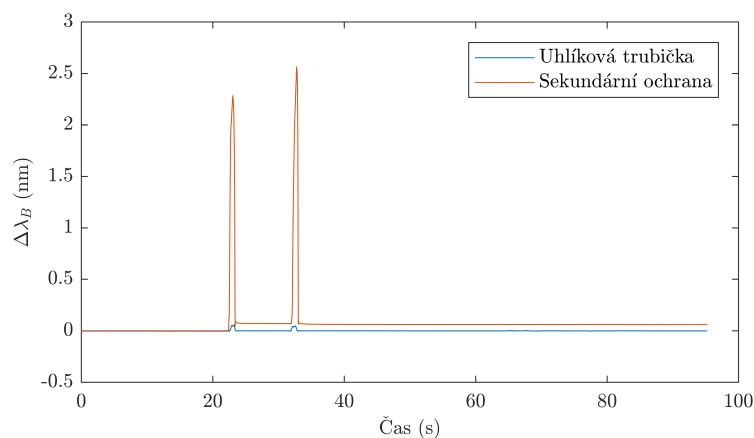
Toto testování je prováděno automobilem Škoda Octavia II. Přejezdy jsou prováděny přes středy pásů i na obou koncích testovaných pásů. Nejprve jsou pásy položeny na gumový podklad a gumovým pásem jsou překryty. Poté je guma z vršků pásů odstraněna a pásy jsou přejížděny pouze na gumové podložce. V poslední variantě jsou pásy přejížděny bez gumových ochranných pásů. Výsledné velikosti jednotlivých posunů vlnových délek lze vidět v tabulkách 4.11 a 4.12.



Obrázek 4.17: Měřicí pás na podložce focen ze směru jízdy

Pro srovnání odezev je použito přejetí automobilu přes pás ve směru vpřed a zpět pomocí couvání.

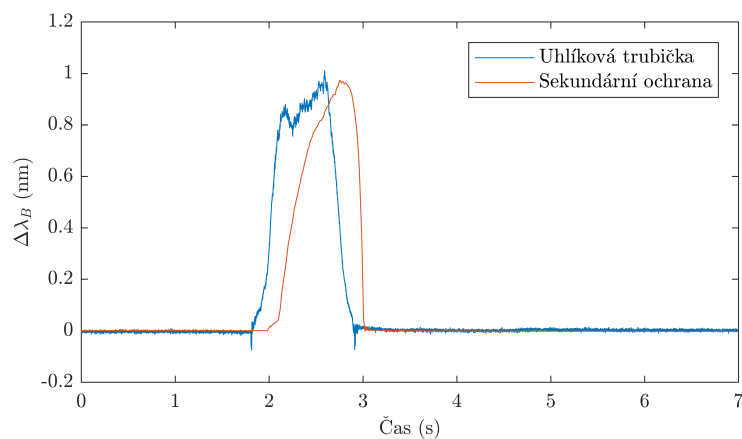
Po najetí automobilu na střed pásu, kde se nachází mřížka FBG, jsou vidět jednotlivé změny vlnových délek na obrázku 4.18.



Obrázek 4.18: Velikost změny vlnové délky po přejetí středem pásů

Na grafu je vidět, že jednotlivé změny jsou velice rychlé v čase a změna vlnové délky u pásu se sekundární ochranou je velká. V maximu dosahuje změna vlnové délky až 2,564 nm.

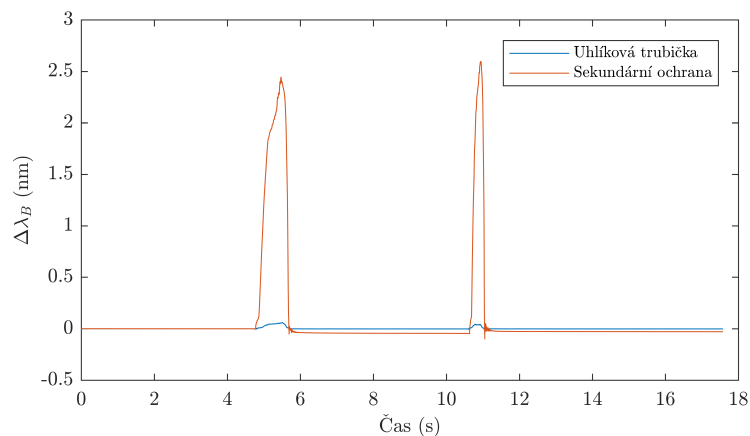
Pro porovnání tvaru křivky při průjezdu je použit normalizovaný graf, na kterém lze vidět tvar jednotlivých špiček. Z porovnání tvarů vyplývá, že vlákno v sekundární ochraně má vyhlazenější a čistší průběh deformace při přejezdu. Tvar špičky u uhlíkové trubičky je kostřbatý, jelikož dochází k chvění a otřesům vlákna s FBG o stěny pevné ochrany.



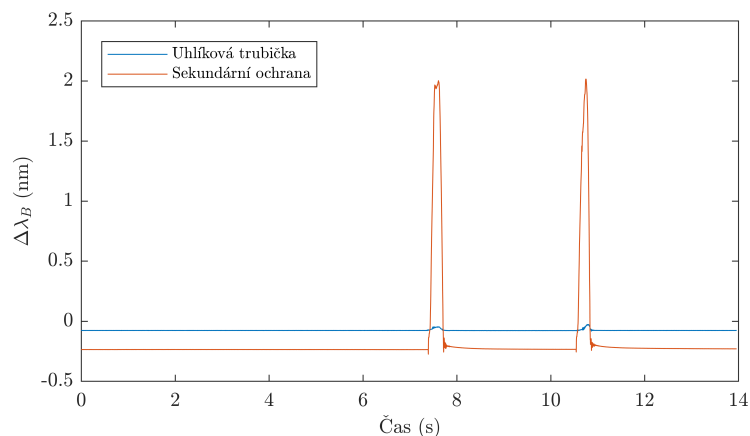
Obrázek 4.19: Normalizovaný graf přejezdů středem

Další přejezdy jsou prováděny na levé straně pásu (pohled ve směru jízdy – viz. Obrázek 4.17). Odezvy lze vidět na obrázku 4.20. Na grafu jsou znázorněny jednotlivé odezvy, které mají delší časovou odezvu než přejezdy přes střed jednotlivých pásů, což je způsobeno vzdáleností přejezdu od FBG senzoru.

Poslední přejezdy jsou uskutečněny přes pravý okraj pásů, pro zjištění citlivosti na všech částech pásu (pohled ve směru jízdy – viz. Obrázek 4.17) Obrázek 4.21 potvrzuje, že přejezdy po okrajích pásů mají delší odezvu v čase, než přejezdy které jsou provedeny přímo přes FBG senzor.



Obrázek 4.20: Velikost změny vlnové délky po přejetí nalevo

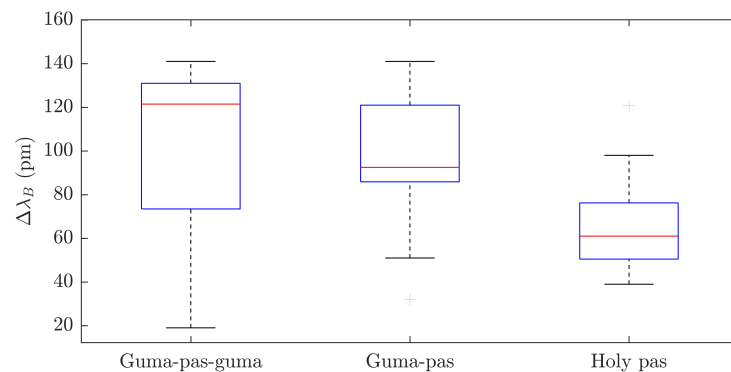


Obrázek 4.21: Velikost změny vlnové délky po přejetí vpravo

Tabulka 4.11: Naměřené hodnoty po přejezdech po pásu s uhlíkovou trubičkou

Struktura	Vlevo			Střed			Vpravo		
	Min [nm]	Max [nm]	Velikost [nm]	Min [nm]	Max [nm]	Velikost [nm]	Min [nm]	Max [nm]	Velikost [nm]
Guma-pás-guma	-0,062	0,056	0,118	-0,056	0,08	0,136	-0,063	-0,03	0,033
	-0,059	0,066	0,125	-0,059	0,082	0,141	-0,069	-0,05	0,019
				-0,059	0,055	0,114			
				-0,061	0,065	0,126			
Guma-pás	-0,06	0,0259	0,0859	-0,061	0,029	0,09	-0,078	-0,046	0,032
	-0,06	0,041	0,101	-0,06	0,035	0,095	-0,078	-0,027	0,051
				-0,063	0,078	0,141			
				-0,063	0,078	0,141			
				-0,061	0,06	0,121			
				-0,061	0,025	0,086			
Pás	-0,075	-0,014	0,061	-0,064	0,034	0,098	-0,079	-0,04	0,039
	-0,077	-0,03	0,047	-0,064	0,057	0,121	-0,082	-0,02	0,062
	-0,081	-0,02	0,061	-0,073	-0,014	0,059	-0,08	-0,03	0,05
	-0,082	-0,023	0,059	-0,074	-0,024	0,05	-0,083	-0,032	0,051
	-0,083	-0,008	0,075				-0,08	-0,038	0,042
	-0,081	-0,0219	0,0591				-0,083	-0,034	0,049
	-0,081	-0,0087	0,0723						
	-0,08	-0,021	0,059						
	-0,084	-0,0048	0,0792						
	-0,081	-0,0135	0,0675						
	-0,081	-0,0035	0,0775						
	-0,085	-0,0062	0,0788						
	-0,082	-0,0024	0,0796						
	-0,081	-0,0098	0,0712						

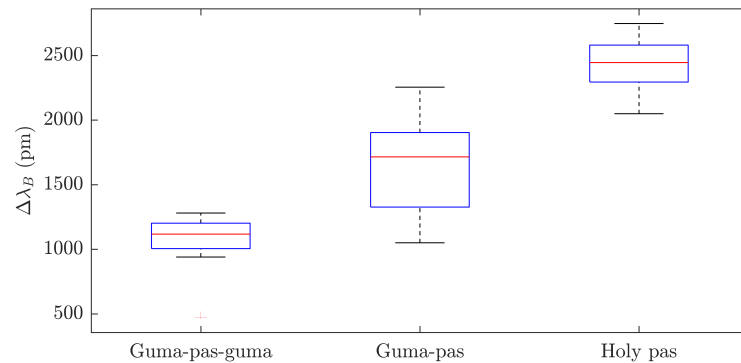
Z hodnot a grafů vyplývá, že pás s uhlíkovou trubičkou je nejvíce citlivý při přejezdu přímo přes FBG senzor a nejmenší změny vlnových délek zaznamenává při přejezdech na pravé straně.



Obrázek 4.22: Krabicové grafy přejezdů přes pás ZA 50 LT

Tabulka 4.12: Naměřené hodnoty po přejezdech po pásu se sekundární ochranou vlákna

Struktura	Vlevo			Střed			Vpravo		
	Min [nm]	Max [nm]	Velikost [nm]	Min [nm]	Max [nm]	Velikost [nm]	Min [nm]	Max [nm]	Velikost [nm]
Guma-pás-guma	-0,095	1,148	1,243	-0,15	0,98	1,13	-0,01	0,93	0,94
	-0,087	1,193	1,28	-0,054	1,05	1,104	-0,01	0,46	0,47
				-0,09	1,07	1,16			
				-0,044	1,026	1,07			
Guma-pás	-0,11	1,628	1,738	-0,14	1,159	1,299	-0,23	2,003	2,233
	-0,11	1,4	1,51	-0,098	1,228	1,326	-0,24	2,015	2,255
				-0,11	1,682	1,792			
				-0,1	1,803	1,903			
				-0,1	1,592	1,692			
				-0,1	0,95	1,05			
Pás	-0,18	2,264	2,444	-0,12	2,286	2,406	-0,2	2,035	2,235
	-0,18	2,41	2,59	-0,12	2,326	2,446	-0,21	2,36	2,57
	-0,28	1,885	2,165	-0,23	2,05	2,28	-0,22	1,83	2,05
	-0,23	2,365	2,595	-0,16	2,319	2,479	-0,22	2,201	2,421
	-0,24	2,069	2,309				-0,25	1,87	2,12
	-0,24	2,426	2,666				-0,21	2,026	2,236
	-0,24	2,107	2,347						
	-0,24	2,247	2,487						
	-0,24	2,378	2,618						
	-0,23	2,518	2,748						
	-0,24	2,279	2,519						
	-0,24	2,376	2,616						
	-0,23	2,127	2,357						
	-0,24	2,227	2,467						



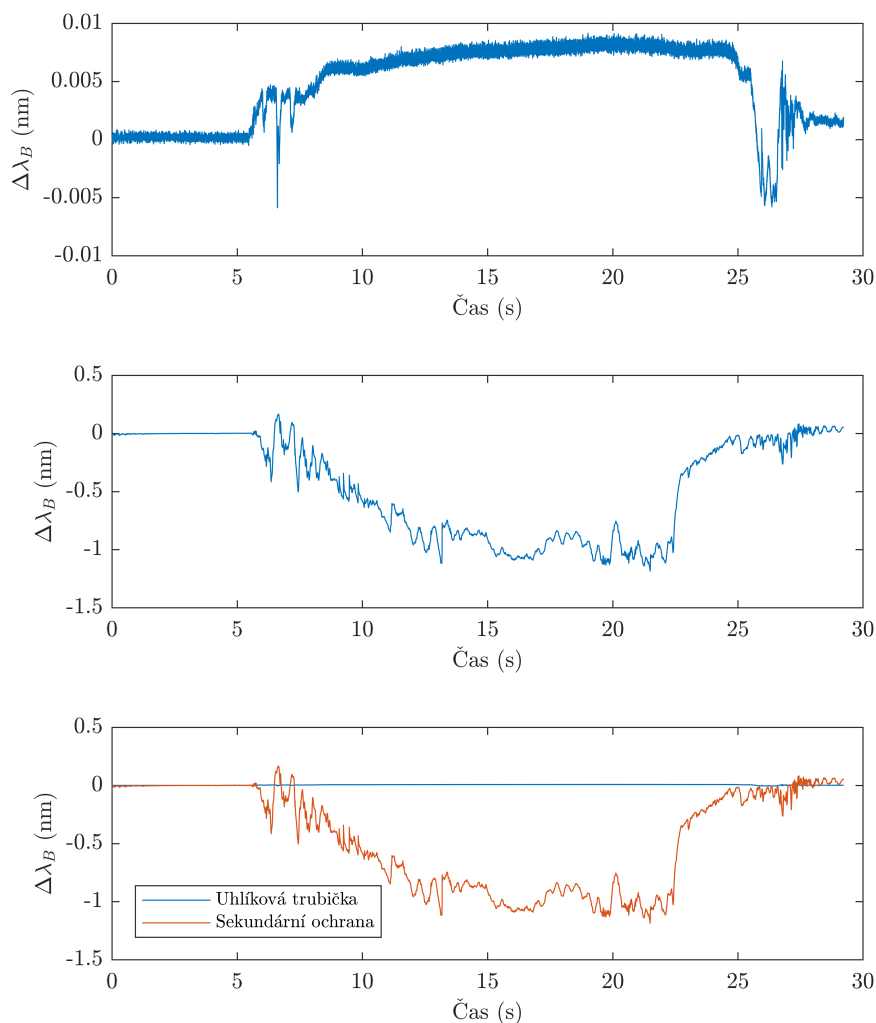
Obrázek 4.23: Krabicové grafy přejezdů přes pás se sekundární ochranou

U pásu se sekundární ochranou je zjištěno, že přejíždění pásu vlevo a přes senzor má velmi podobné výsledky, zatímco přejíždění pásu vpravo přináší rozdílné výsledky pro různé struktury. Nejmenší změna vlnové délky je v případě použití struktury guma – pás – guma.

#### 4.3.4 Odolnost pásů na ohyb

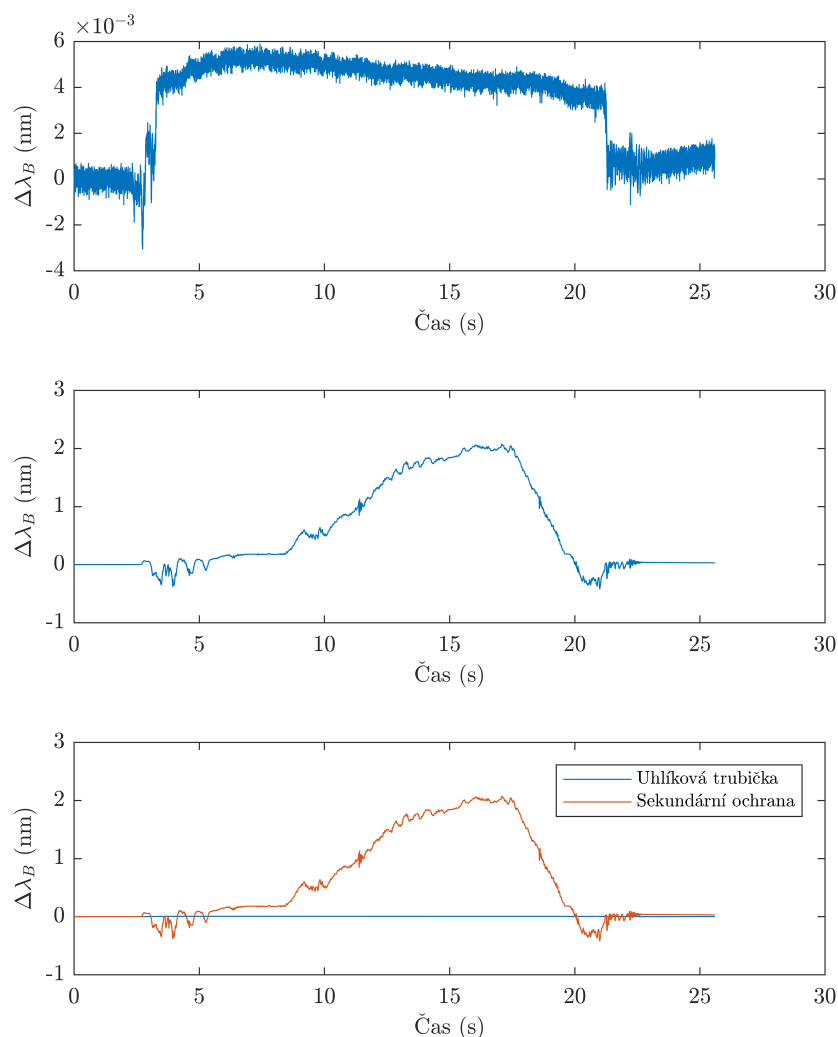
Dalším testovaným parametrem měřících pásů je odolnost a citlivost vlákna při ohybu pásu o  $90^\circ$ .

Nejprve jsou pásy ohýbány do úhlu  $90^\circ$  a následně zpět do výchozí polohy. Pásy jsou ohýbány konvexním způsobem a změny vlnové délky jsou zakresleny v grafech níže. Nejprve je vyobrazen ohyb pásu s uhlíkovou trubičkou u kterého je změna Braggovské vlnové délky do 0,01 nm. Na druhém obrázku je vyobrazen ohyb pásu se sekundární ochranou a změna Braggovské vlnové délky je zde až o 1,18 nm.



Obrázek 4.24: Srovnání pásů při konvexním profilu ohybu

Poté jsou pásy namáhány ohybem za pomoci konkávního profilu ohybu opět od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  a následně zpět do výchozí polohy. Průběh ohybu pásu s uhlíkovou trubičkou je vyobrazen na prvním obrázku a změna Braggovské vlnové délky je v řádech tisícín nanometrů. U uhlíkové trubičky je změna Braggovské vlnové délky až o 2 nm.



Obrázek 4.25: Srovnání pásů při konkávním profilu ohybu

Z porovnání jednotlivých ohybů je vidět, že pás s uhlíkovou trubičkou není na ohyb téměř citlivý a vlákno je bezpečně ochráněno. Zatímco při ohýbání pásu se sekundární ochranou lze vidět, že změna vlnové délky je o mnoho větší a vlákno je citlivější na ohyby (u konvexního ohybu až 118x, u konkávného ohybu dokonce až 333x) a jeho změna vlnové délky závisí dokonce i na směru ohybu vlákna. Při ohybech vlákna konvexním profilem je změna vlnové délky záporná, zatímco při ohýbání konkávním profilem je změna vlnové délky kladná. Velikost změn vlnových délek u pásu se sekundární ochranou je natolik velká, že pro fyzické použití do ruchu silničního provozu není ideální a hrozí prasknutí vlákna vlivem většího namáhání.

Pro další experimenty je proto zvolena ochrana vlákna pomocí uhlíkové trubičky, která dokáže vozidla bezpečně detekovat, není tolik náchylná na teplotní změny a má vyšší odolnost pro použití v dopravním ruchu.



## 5 Monitorování hustoty dopravy s mobilním pásem FBG

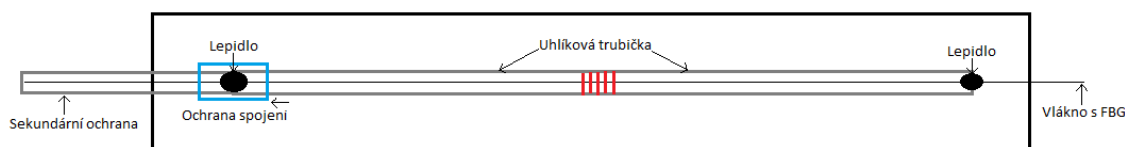
### 5.1 Realizace pásu a ověření funkčnosti v reálném provozu

K výrobě měřicího pásu je použito vlákno s vlnovou délkou 1573,158 nm, uhlíková trubička na ochranu vlákna se senzorem, dvousložkové lepidlo, vlákno s pigtailem, ochrana svázu a sekundární ochrana, která je použita na vlákno přesahující měřicí pás a silikon ZA 50 LT.

Měřicí pás dlouhý 2,5 metru je sestaven dle schématu na obrázku 5.1

Tabulka 5.1: Vlastnosti použitého FBG vlákna

Vlnová délka FBG vlákna [nm]	1573,158
Délka FBG senzoru	10mm
Propustnost [%]	94,04
Materiál a typ vlákna	Akrylát SMF-28



Obrázek 5.1: Schéma vyrobeného pásu

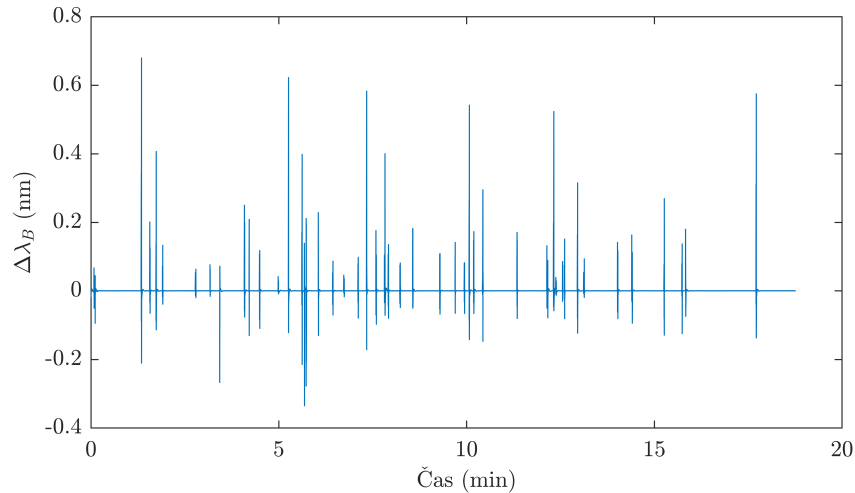
Po napnutí vlákna a vytvrzení silikonu je vlnová délka 1573,766 nm. Následně je pás experimentálně otestován v provozu. Toto testování proběhlo v ulici Hlubočická v Ostravě dne 21. 11. 2018.



Obrázek 5.2: Položení pásu na vozovku ve směru nahoru

Experimentální měření trvá necelých 19 minut během kterých přes pás projíždí celkem 46 vozidel. Přes pás je z důvodu velké šíře vozovky přejížděno různými způsoby (polovinou nápravy automobilu i celým automobilem), ve směru dolů i nahoru (pohled na obrázku 5.2).

Na výsledná data je při zpracování použitý filtr typu horní propusti, který odfiltrává nepotřebný šum pro následnou lepší detekci jednotlivých přejezdů.

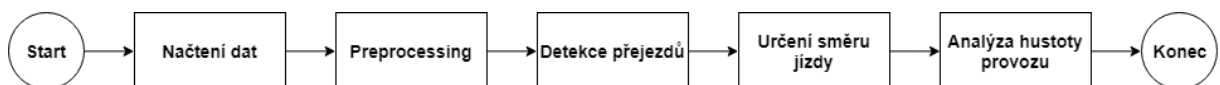


Obrázek 5.3: Detekované přejezdy

Z výsledného grafu 5.3 lze říci, že pás dokáže detekovat všech 46 přejezdů, které se uskutečnily.

## 5.2 Metody zpracování naměřených dat

V této kapitole je popsán postup pro zpracování naměřených dat. Nejprve je potřeba naměřená data načíst, následuje preprocessing, detekce jednotlivých přejezdů a určení hledaných parametrů. Vývojový diagram a postup jednotlivých kroků je znázorněn na obrázku 5.4. Celý proces zpracování dat v této práci probíhá v programovém prostředí MATLAB.



Obrázek 5.4: Postup zpracování dat

### 5.2.1 Načtení dat

Výstupní data z měřicí jednotky jsou ukládána do souboru s příponou .csv. V souboru jsou data uložena ve dvou sloupcích. V prvním sloupci je uložena časová značka a ve druhém je ukládána změna vlnové délky v daném okamžiku (viz. obrázek 5.5). Tato data jsou následně importována do programu MATLAB. Při importování dat se využívá metoda **swallow**. Metoda swallow je

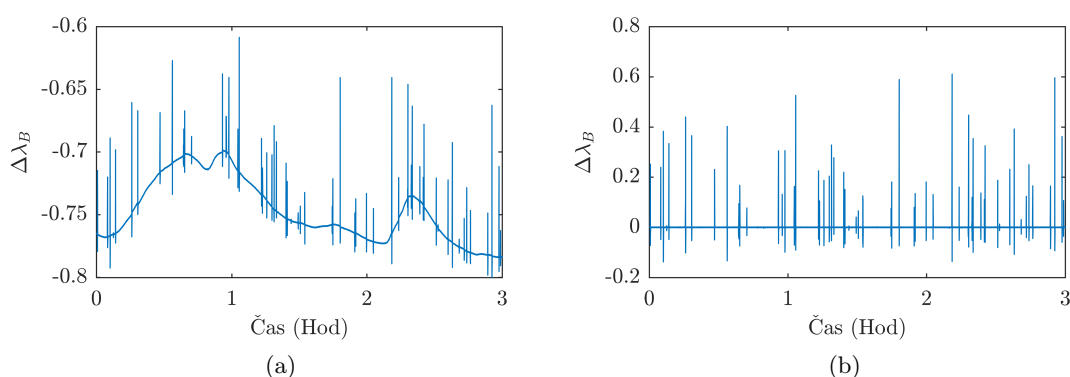
použita z důvodu úspory času. Tato metoda rozdělí průběh načítání .csv souboru do více vláken jádra a tím i několikanásobně urychlí celý proces. Pro příklad, soubor který se načítá 10 sekund na 8-mi jádrovém procesoru, je načten s knihovnou swallow za 1.25 s. Data jsou ukládána do dvou proměnných (**time** - časová značka a **avg** - hodnota změny vlnové délky [nm]).

	A	B	C	D
1	time	avg	event	
2	[dd-mm-yyyy hh:mm:ss.usec]	[nm]	[--]	
3	19-03-2019 11:37:28.941941	-0.76517393		
4	19-03-2019 11:37:28.942941	-0.765072052		
5	19-03-2019 11:37:28.943941	-0.765209631		
6	19-03-2019 11:37:28.944941	-0.765039405		

Obrázek 5.5: Struktura výstupních dat z měřicího přístroje

### 5.2.2 Předzpracování - Preprocessing

Preprocessing má za cíl připravit signál do podoby vhodné pro hledání jednotlivých přejezdů. V tomto kroku se na signál aplikují matematické úkony sloužící ke zvýšení hodnoty odstupů signálu od šumu. Mezi základní matematické úkony se signálem patří vynásobení původního signálu konstantou. Při vynásobení signálu konstantou se zvýší poměrová hodnota mezi šumem a žádoucím signálem. Následně je na signál aplikován filtr. Při realizaci filtrace jsou nejvíce využívány IIR filtry. IIR filtry jsou filtry s nekonečnou impulzní odezvou, kterými lze provádět vyhodnocování a číslicovou filtraci signálu. K extrakci naměřených maxim je použit filtr typu horní propust. Pro vyčištění užitečného signálu od šumu je zvolen filtr typu Butterworth, který má velikost odezvy maximálně plochou v propustném směru a celkově monotónní průběh funkce. Mezi další použitelné typy filtrů lze zařadit filtry typu Chebyshev, Besselův filtr, Eliptický filtr atd.



Obrázek 5.6: Průběh měření; (a) před aplikací filtru; (b) po procesu preprocessing

Na obrázku 5.6(a) jsou zobrazena data z měření před úpravami a aplikací filtru, zatímco na obrázku 5.6(b) je signál, který je vynásoben konstantou a následně je na něj aplikován filtr typu Butterworth horní propust s mezní frekvencí  $0.4 \cdot 10^{-3}$  Hz.

### 5.2.3 Detekce přejezdů

K detekci přejezdů je vhodné použít funkci **findpeaks**, která nachází v signálu lokální maxima a ukládá jejich hodnotu do proměnné **pks** a časovou značku do proměnné **locs**. Funkce **findpeaks** má několik atributů, které slouží k nastavení vyhledávacích parametrů. Těmi parametry jsou:

- **MinPeakHeight** - udává minimální velikost hledané špičky. Vrací pouze špičky, které jsou větší než zadaná hodnota
- **MinPeakProminence** - hodnota, o kolik musí špička převyšovat ostatní špičky v daném okolí
- **Threshold** - udává minimální výškový rozdíl mezi sousedy
- **MinPeakDistance** - udává minimální separaci špiček. Algoritmus vybere nejvyšší vrchol signálu a ostatní vrcholy v okolí ignoruje
- **MinPeakWidth/MaxPeakWidth** - udává minimální/maximální šířku špičky
- **WidthReference** - hodnota referenční výšky pro měření šířky špičky

### 5.2.4 Určení směru jízdy

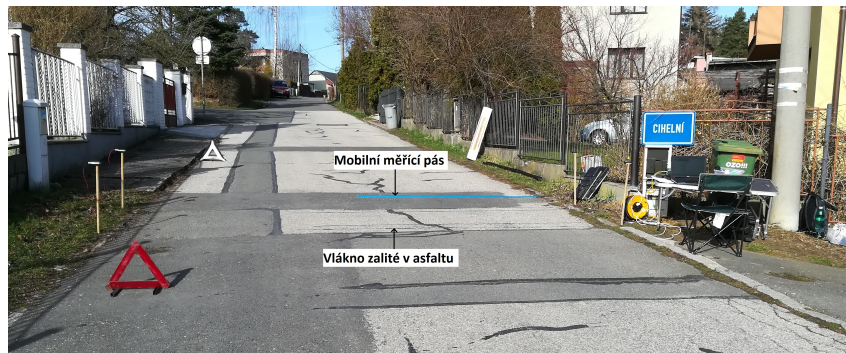
Jedním z možných parametrů v automobilové dopravě může být určování směru jízdy jednotlivých vozidel. K určení jízdního směru je zapotřebí mít data minimálně ze dvou senzorů umístěných na vozovce. Na těchto datech musí být proveden preprocessing a následná detekce přejezdů. Pokud je detekce přejezdů úspěšná, na datech z obou měřících jednotek můžeme určit směr jízdy vozidla. Směr jízdy se určí na základě časových značek uložených v proměnné **pks** a to tak, že jsou porovnány časové značky z obou měřících jednotek. Pokud by byla známa i vzdálenost mezi jednotlivými měřícími senzory, lze na základě těchto dat dopočítávat i rychlost vozidel pomocí rovnice (5).

### 5.2.5 Analýza hustoty provozu

Posledním krokem při zpracování dat v této práci, je analýza hustoty provozu. Analýza je prováděna s pomocí cyklu **for**, který prochází detekované a uložené přejezdy a ke každému přejezdu přiřadí časovou značku ve tvaru dd-MM-yyyy HH:mm:ss.SSS, na základě které je přejezd následně roztríděn do příslušného časového období v počítačle, jehož velikost je předem definována. Analýza provozu může být například půlhodinová, hodinová, denní, týdenní, měsíční či dokonce roční. Jaký typ analýzy se zvolí záleží na délce a množství naměřených dat.

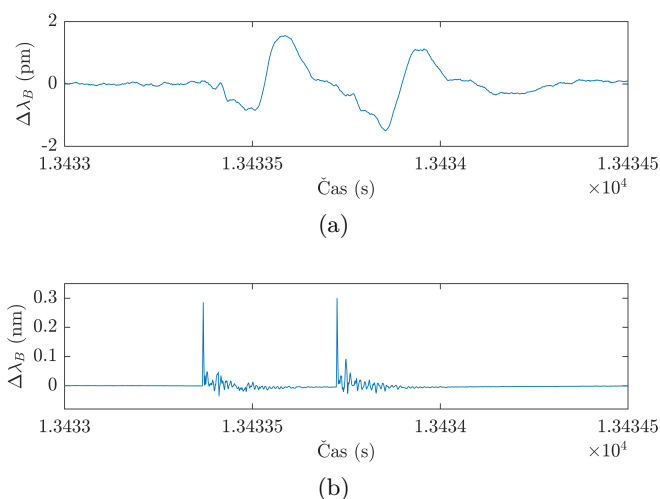
### 5.3 Monitorování hustoty na veřejné komunikaci

Monitorování hustoty provozu probíhalo v ulici Hlubočická v Krásném Poli dne 19. 3. 2019. Cílem tohoto monitorování je zaznamenat všechny průjezdy vozidel během dne v ulici a následně určit směr jízdy vozidel. K určení směru je zapotřebí využít data z více měřících senzorů než jen z mobilního pásu. Proto jsou využita data ze senzoru, který se zde nachází dlouhodobě. Jedná se o senzor, který je pevně zapouzdřený v zemi a vlákno s FBG senzorem je chráněno uhlíkovou trubičkou stejně jako v měřícím pásu. Měřící pracoviště včetně rozmístění senzorů je znázorněno na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Měřící pracoviště vč. rozmístění měřících senzorů ve směru nahoru

Označení směru je určeno sklonem vozovky, na které je měřeno. Směr nahoru znamená, že automobil nejprve přejíždí vlákno zalité v asfaltu a až následně měřící mobilní pás. Naopak směr dolů znamená, že první je přejet mobilní pás, následně vlákno zalité v asfaltu. Při zpracování dat je na signál z mobilního pásu aplikován filtr typu horní propust s mezní frekvencí  $0.4 \cdot 10^{-3}$  Hz. Na signál z asfaltu je použit filtr horní propusti s mezní frekvencí 0.004 Hz, jelikož data z toho senzoru jsou více zašuměná. Znázornění jednoho přejezdu ze senzoru je na obrázku 5.8.

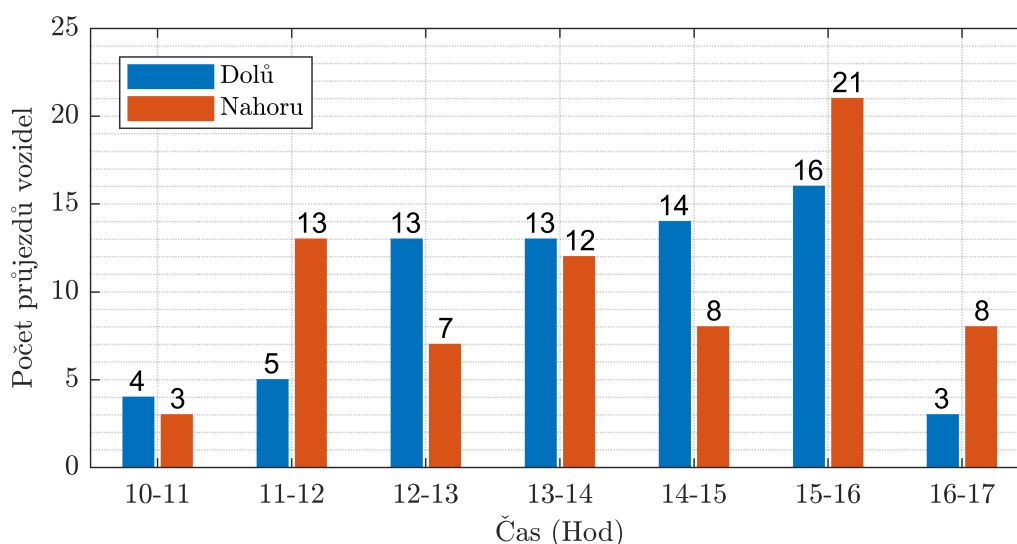


Obrázek 5.8: Detekovaný průjezd vozidla; (a) přes senzor v asfaltu; (b) přes mobilní pás

Během monitorování je prováděno i ruční zaznamenávání všech přejezdů přes měřící pás pro pozdější určení přesnosti detekce. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 5.2. Následně je vyhotovena hodinová analýza přejezdů vozidel, na které je vidět zvýšený provoz mezi 15 a 16 hodinou (obrázek 5.9). U senzoru v asfaltu je zaznamenáno více průchodů osob přes senzor, což je zapříčiněno úpravou okolí během měření. Během těchto úprav není šlapáno na mobilní pás, tudíž tyto průchody jsou zaznamenány pouze u senzoru v asfaltu. Při následném zpracování dat jsou všechny průchody osob vyfiltrovány a pro určení směru jsou použita data pouze z průjezdů vozidel.

Tabulka 5.2: Úspěšnost detekce měření

	Detekované průjezdy/přechody		Úspěšnost detekce [%]	
	Automobily	Osoby	Automobily	Osoby
<b>Mobilní pás</b>	140	3	100	60
<b>Vlákno v asfaltu</b>	140	-	100	-
<b>Ruční záznam</b>	140	5	-	-

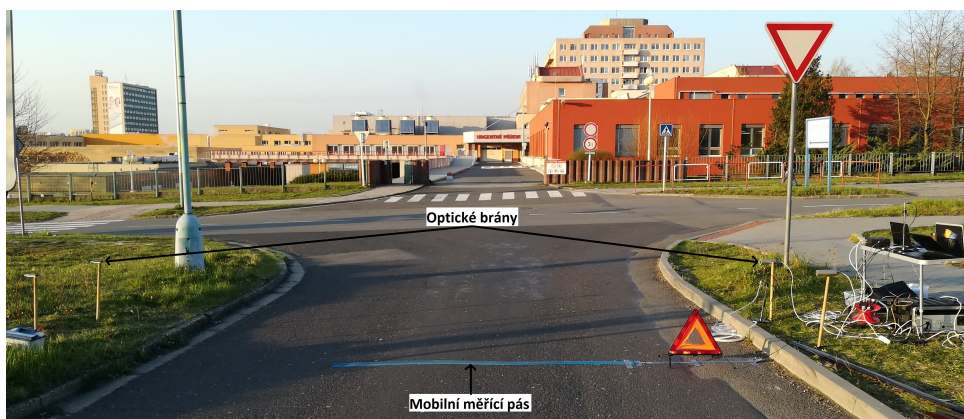


Obrázek 5.9: Hodinový graf průjezdů

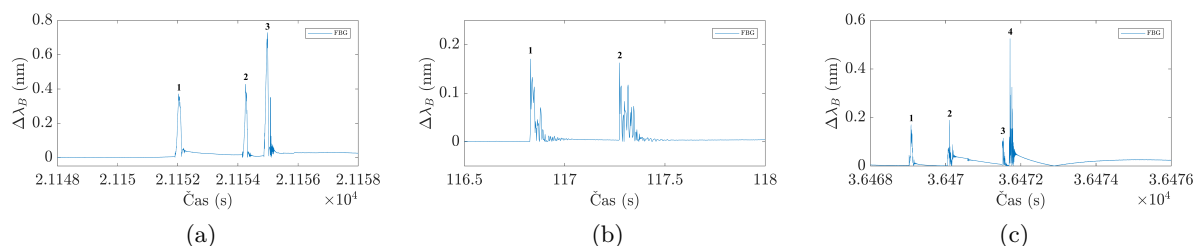


## 5.4 Monitorování hustoty na parkovišti

Měření hustoty dopravy na parkovišti probíhalo u hlavního vjezdu do areálu VŠB-TU Ostrava. K monitorování dopravy a k následnému určení směru jízdy vozidel je použit mobilní měřící pás a dvě optické brány. První optická brána je umístěna na stejné úrovni jako mobilní pás. Druhá optická brána je umístěna od pásu ve vzdálenosti 1 m. Měřící pracoviště včetně rozmístění jednotlivých měřících senzorů je vyobrazeno na obrázku 5.10. Dále je proveden ruční zápis všech průjezdů, sloužící jako referenční hodnota při následné analýze dat z měřících senzorů.

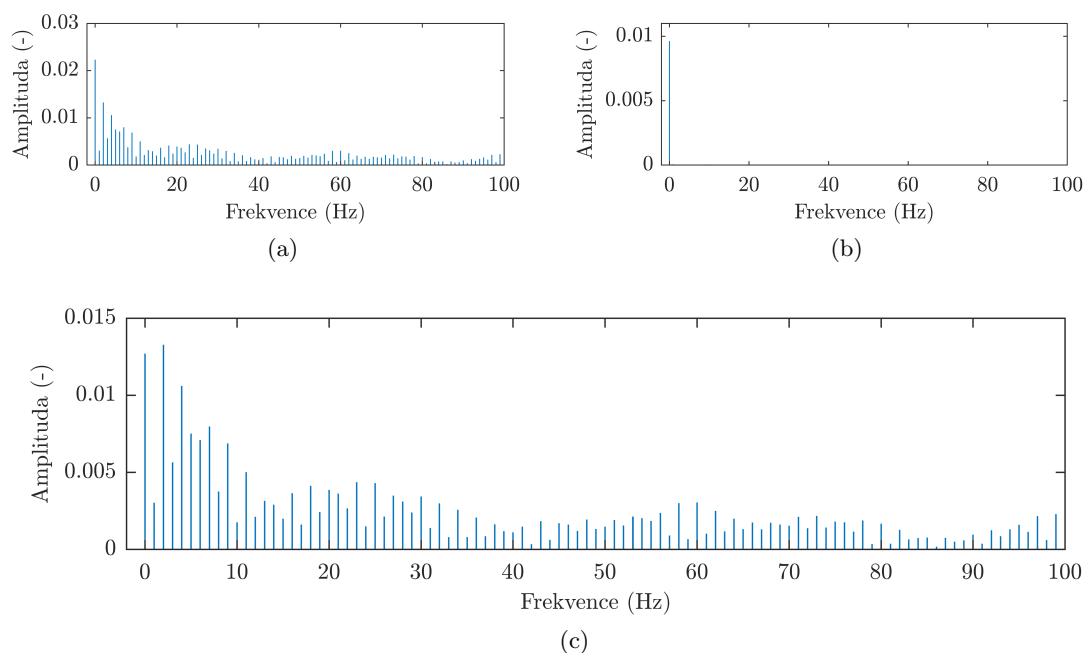


Obrázek 5.10: Měřící pracoviště



Obrázek 5.11: Detekované průjezdy vozidel; (a) popelářské vozidlo - 3 nápravy; (b) automobil - 2 nápravy; (c) automobil s vozíkem - 2 + 2 nápravy

Během měření projížděla přes měřící stanoviště vozidla s odlišným počtem náprav. Na obrázku 5.11(a) je zobrazen přejezd popelářského vozidla se třemi nápravami, na (b) je zobrazen dvounápravový osobní automobil a na obrázku (c) přejezd osobního automobilu s dvounápravovým vozíkem, který dokázal mobilní pás bez problému detekovat.



Obrázek 5.12: Frekvenční spektrum (a) přejezdu; (b) šumu; (c) s odečteným šumem

Při zpracování dat je na data z mobilního pásu aplikován filtr typu horní propust s mezní frekvencí  $0,25 \cdot 10^{-3}$  Hz. Vzorkovací frekvence na měřicím přístroji je nastavena na 500 Hz. Na vybraných přejezdech je také provedena frekvenční analýza. Na obrázku 5.12 je vyobrazeno frekvenční spektrum přejezdu automobilu, jehož časový průběh je zobrazen na obrázku 5.11(b). Provedená analýza ukazuje vztah mezi změnou velikosti odezvy pásu a dominantní frekvencí. Čím větší je odezva pásu, tím vyšší je dominantní frekvenční složka ve spektru.

Úspěšnost detekce jednotlivých měřicích senzorů je zaznamenána v tabulce 5.3. Nejvyšší úspěšnost při tomto měření má mobilní měřicí pás, který detekuje 97,83% průjezdů. Vzniklá chyba detekce je způsobena řidiči, kteří na pás najeli pouze okrajově, což má za následek, že při zpracovávání dat jsou tyto průjezdy odfiltrovány jako šum. Velmi nízká úspěšnost optických bran, je způsobena jejich konstrukcí (viz. kapitola 3.5). Pro vyšší úspěšnost detekce ve slunném počasí by bylo zapotřebí, použití jiného typu filtru na detektoru. Řešením by bylo použití filtru typu pásmová propust, který by byl citlivý pouze na vlnových délkách zdroje záření.

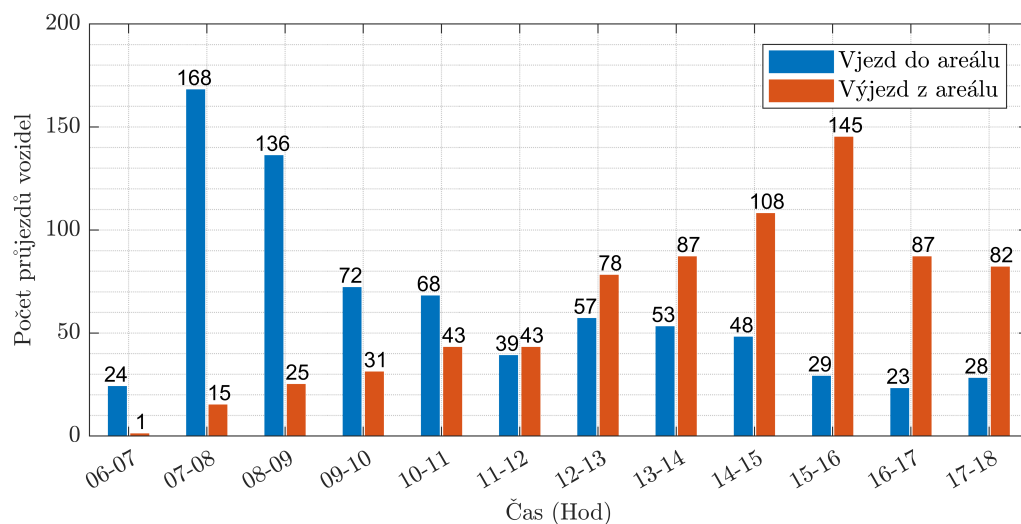
Tabulka 5.3: Úspěšnost detekce měření

	Počet přejezdů	Úspěšnost detekce [%]
<b>Ruční záznam</b>	1523	-
<b>Mobilní pás</b>	1490	97,83
<b>Optická brána 1</b>	1020	66,97
<b>Optická brána 2</b>	422	27,71

Z úspěšně detekovaných přejezdů vozidel mobilním pásem je vyhotoven hodinový graf (ob-



rázek 5.13) zobrazující počty vozidel včetně směru jízdy. K určení směru jízdy jsou použita data z ručního zápisu. V ranních hodinách (mezi 7 a 10 hodinou) je zvýšený provoz vozidel vjíždějících do areálu, zatímco v odpoledních je zaznamenán zvýšený počet vozidel opouštějící areál. Nejvyšší počet vozidel u hlavní brány byl zaznamenán mezi 7 a 8 hodinou ranní.



Obrázek 5.13: Hodinová analýza detekovaných průjezdů pásem

## Závěr

Braggovské mřížky se řadí díky svým vlastnostem mezi nejrozšířenější typ optovláknových senzorů. Využívají se pro snímání fyzikálních, chemických a dalších veličin. FBG jsou jednobodové senzory, které mají celou řadu výhod oproti starším technologiím. Nespornou výhodou je odolnost vůči elektromagnetickému záření a možnost multiplexování vícero FBG senzorů na jednom vlákně.

V této práci jsem se věnoval monitorování hustoty automobilové dopravy pomocí optovláknového Braggovského senzoru. Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat mobilní měřicí pás s FBG senzorem.

V teoretickém úvodu jsem popsal druhy optických vláken využívaných v komunikacích. Následovala kapitola popisující Braggovské mřížky. Je zde popsána historie, typy, vlastnosti a využití FBG.

Třetí kapitolou této práce je rešerše dané problematiky a popsání stávajících metod monitorování v automobilové dopravě. Při popisování metod měření jsem se zaměřil na piezoelektrické senzory, indukční smyčky, laserové měření a měření pomocí optických bran, které jsem během své práce také využil. Po zmapování měřících metod jsem zpracoval rešerše na téma aplikace optických senzorů v automobilové dopravě, kde jsem popsal několik článků a technologií zaměřujících se na tuto problematiku. Poté co jsem zpracoval teoretický úvod a rešerše s danou problematikou, jsem přistoupil k praktické části této práce.

Praktická část je rozdělena do dvou kapitol. První kapitola se zaměřuje na výrobu experimentálních pásů. Při výrobě jsem nejprve musel vybrat materiál vhodný na realizaci pásů. Základní podmínkou pro výběr materiálu byla schopnost jeho vytvrzení při běžné pokojové teplotě a to z důvodu absence dostatečně velké pece. Celkem jsem vybral 5 různých silikonů od firmy ELCHEMCo. Z každého vybraného materiálu jsem vyrobil odlitky, které jsem následně podrobil testu. Každý odlitek jsem přejel 20x osobním automobilem a následně na něm také několikrát zabrzdil a zastavil. Jednotlivé materiály použité při výrobě odlitků jsou popsány v kapitole 4.1.

Dalším krokem po vybrání vhodných materiálů bylo sestrojení dvou experimentálních pásů (kapitola 4.2). Každý pás byl vytvořen z jiného materiálu a do pásů byly implementovány vlákna s FBG, která nebyla žádným způsobem chráněna. U tohoto experimentu jsem měřil změnu vlnové délky v průběhu vytvrzování. Díky procesu vytvrzování jsem získal informace o vlivu materiálu na vlákno. Následně jsem pásy otestoval na dopravní komunikaci, kde byly experimentálně přejížďeny různými typy vozidel. Díky tomuto experimentu jsem určil vhodný materiál, se kterým jsem dále pracoval a zjistil jsem, že na vlákno s FBG musím nasadit dostatečně pevnou ochranu.

V dalším experimentu jsem vyrobil dva mobilní pásy z jednoho mnou vybraného materiálu a testoval jsem různé typy ochrany vlákna (kapitola 4.3). Během tohoto experimentu jsem určoval změnu vlnové délky v závislosti na teplotě, následně jsem pásy otestoval v provozu a zjišťoval jsem jejich odolnost vůči ohybům. Cílem všech těchto experimentů bylo najít vhodnou kombinaci materiálů pro měřicí pás použitelný v reálném provozu.

V druhé kapitole praktické části popisuji výrobu finálního měřicího pásu a otestování jeho funkčnosti v reálném provozu. Dále zde popisuji postup zpracování naměřených dat v programu MATLAB a provedená měření včetně analýzy hustoty dopravy. Závěrem diplomové práce jsem prováděl měření nejprve na veřejné komunikaci v ulici Hlubočická v Krásném Poli (kapitola 5.3). Poté jsem monitoroval hustotu dopravy u hlavního vjezdu do areálu Vysoké školy Báňské - Technické univerzity Ostrava (kapitola 5.4).

Mobilní měřicí pás vyrobený v této diplomové práci může být na základě získaných dat použit k monitorování automobilové dopravy s vysokou úspěšností.

## Literatura

- [1] Druhy optických vláken. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/05.html>
- [2] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>
- [3] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.651.1/en>
- [4] SENIOR, John M. a M. Yousif JAMRO. Optical fiber communications: principles and practice. 3rd ed. New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009. ISBN 013032681X.
- [5] KASHYAP, Raman. Fiber Bragg gratings. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2010. ISBN 978-0-12-372579-0.
- [6] OTHONOS, Andreas. Fiber Bragg gratings. Review of Scientific Instruments [online]. 1997, 68(12), 4309-4341 [cit. 2019-03-15]. DOI: 10.1063/1.1148392. ISSN 0034-6748. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1148392>
- [7] LU, Xiao-Yun, Pravin VARAIYA, Roberto HOROWITZ, Zhaomiao GUO a Joe PALEN. Estimating Traffic Speed with Single Inductive Loop Event Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board [online]. 2012, 2308(1), 157-166 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.3141/2308-17. ISSN 0361-1981. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2308-17>
- [8] MARKEVICIUS, Vytautas, Dangirutis NAVIKAS, Mindaugas ZILYS, Darius ANDRIUKAITIS, Algimantas VALINEVICIUS a Mindaugas CEPENAS. Dynamic Vehicle Detection via the Use of Magnetic Field Sensors. Sensors. 2016, 16(1), s. 78-. DOI: 10.3390/s16010078. ISSN 1424-8220.
- [9] XIAO, Jian, Xiang ZOU a Wenyao XU. EPave: A Self-Powered Wireless Sensor for Smart and Autonomous Pavement. Sensors [online]. 2017, 17(10) [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.3390/s17102207. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2207>
- [10] NEDOMA, Jan. Nedestruktivní optovláknový senzorový systém pro měření rychlosti v dopravním provozu [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/127358>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [11] MELLER, Scott A., Marten J. DE VRIES, Vivek ARYA, Kent A. MURPHY, Richard O. CLAUS, Alan C. CHACHICH a Marten J. DE VRIES. [online]. In: . 1995-12-27, s. 39-45 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1117/12.228919. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1009215>

- [12] MELLER, Scott A., Marten J. DE VRIES, Vivek ARYA, et al. [online]. In: . 1998-1-27, s. 318-322 [cit. 2019-02-28]. DOI: 10.1117/12.300853. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=932099>
- [13] John M. SEIM, Eric UDD, Whitten L. SCHULZ, Robert MACMAHON, Steven M. SOLTESZ, Harold M. LAYLOR, Development and deployment of fiber optic highway and bridge monitoring sensor systems. In: Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV [online]. 2000-06-09; [cit. 2019-01-04]. DOI: 10.1117/12.387840 Dostupné z: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.387840>
- [14] TAN, Yi-qiu, WANG HAI-PENG, SUN ZONG-JIE, LI YAN-WEI a SHI XIN. Calibration method of FBG sensor based on asphalt pavement indoor small size test. In: Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE) [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1390-1394 [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1109/TMEE.2011.6199466. ISBN 978-1-4577-1701-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6199466/>
- [15] KUNZLER, Marley, Robert EDGAR, Eric UDD, et al. [online]. In: . 2002-6-28, s. 238-243 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1117/12.472559. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=883011>
- [16] KUNZLER, Marley, Eric H. ANDERSON, Eric UDD, Tad TAYLOR a Wesley KUNZLER. Second-generation fiber grating traffic monitoring systems on the I-84 freeway [online]. In: . 2003-8-12, s. 230- [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1117/12.483693. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.483693>
- [17] AL-TARAWNEH, Mu'ath, Ying HUANG a Hoon SOHN. In-pavement fiber Bragg grating sensor for vehicle speed and wheelbase estimation. In: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018 [online]. SPIE, 2018, 2018-3-27, s. 84- [cit. 2019-03-12]. DOI: 10.1117/12.2295624. ISBN 9781510616929. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10598/2295624/In-pavement-fiber-Bragg-grating-sensor-for-vehicle-speed-and/10.1117/12.2295624.full>
- [18] Vysokorychlostní dynamické vážení za jízdy | OptiWIM. Vysokorychlostní dynamické vážení za jízdy | OptiWIM [online]. Copyright [cit. 05.03.2019]. Dostupné z: <http://www.optiwim.cz/>
- [19] Vážení za jízdy (WIM) :: CAMEA. [online]. Copyright 1995 [cit. 05.03.2019]. Dostupné z: <https://www.camea.cz/cz/doprava/vazeni-za-jizdy-wim/>
- [20] Cosentino, Paul.J.,Eckroth, Wulf von & Grossman Barry,G.2003, Analysis of Fiber Optic Traffic Sensors in Flexible Pavements, Journal of Transportation Engineering 129(5):549-557

- [21] MALLA, Ramesh, Amlan SEN a Norman GARRICK. A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways. *Sensors* [online]. 2008, 8(4), 2551-2568 [cit. 2019-03-07]. DOI: 10.3390/s8042551. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/4/2551>
- [22] WYROWSKI, Frank, John T. SHERIDAN, Youri MEURET, et al. Fiber optic system design for vehicle detection and analysis [online]. In: . 2016-4-27, 98892D- [cit. 2019-03-15]. DOI: 10.1117/12.2239549. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2239549>
- [23] MARKEVICIUS, Vytautas, Dangirutis NAVIKAS, Mindaugas ZILYS, Darius ANDRIUKAITIS, Algimantas VALINEVICIUS a Mindaugas CEPENAS. Dynamic Vehicle Detection via the Use of Magnetic Field Sensors. *Sensors* [online]. 2016, 16(1) [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.3390/s16010078. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/1/78>
- [24] Heide, P., et al. "A high performance multisensor system for precise vehicle ground speed measurement." *Microwave Journal*, July 1996, p. 22+. Academic OneFile, Accessed 26 Mar. 2019.
- [25] MELLER, Scott A., Noel ZABARONICK, I. GHOREISHIAN, et al. [online]. In: . 1997-2-17, s. 168-174 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1117/12.267142. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1024951>
- [26] RAO, Y. J. a D. A. JACKSON. Principles of Fiber-Optic Interferometry. GRATAN, K. T. V. a B. T. MEGGITT, ed. *Optical Fiber Sensor Technology* [online]. Boston, MA: Springer US, 2000, 2000, s. 167-191 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1007/978-1-4757-6081-1. ISBN 978-1-4419-4983-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-6081-1>
- [27] YOUNG-IHN LEE, SANG-HO HWANG a YOUNGCHAN KIM. Development and assessment of a traffic adaptive control system in Korea. In: *Proceedings of VNIS'94 - 1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference* [online]. IEEE, 1994, s. 203-208 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1109/VNIS.1994.396840. ISBN 0-7803-2105-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/396840/>
- [28] GHOSH, Sumit a Tony S. LEE. *Intelligent transportation systems: smart and green infrastructure design*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2010. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.). ISBN 9781439835180.
- [29] E Udd, M Kunzler, M Laylor, W Schulz, S Kreger, J Coronas, R McMahon, S Soltesz, and R Edgar. Fiber grating systems for traffic monitoring. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4337(1):510-516, 2001.

- [30] YOUNG-IHN LEE, SANG-HO HWANG a YOUNGCHAN KIM. Development and assessment of a traffic adaptive control system in Korea. In: Proceedings of VNIS'94 - 1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference [online]. IEEE, 1994, s. 203-208 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1109/VNIS.1994.396840. ISBN 0-7803-2105-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/396840/>